



HAL
open science

Caractérisation expérimentale de sources vibratoires et acoustiques

Q. Leclere

► **To cite this version:**

Q. Leclere. Caractérisation expérimentale de sources vibratoires et acoustiques. Acoustique [physics.class-ph]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. tel-01006188

HAL Id: tel-01006188

<https://theses.hal.science/tel-01006188>

Submitted on 14 Jun 2014

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée devant

l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
et l'Université Claude Bernard LYON I

Titre :
Caractérisation expérimentale de sources vibratoires et acoustiques

SPECIALITE :
Acoustique

par
Leclère, Quentin

Soutenue le 7 décembre 2012 devant la Commission d'examen

(par ordre alphabétique)

Antoni, Jérôme,	Prof. des universités,	INSA de Lyon	
Béra, Jean-Christophe,	Prof. des universités,	Université Lyon 1	
Foltête, Emmanuel,	Prof. des universités,	FEMTO-ST	(Président)
Garcia, Alexandre,	Prof. des universités,	CNAM	(Rapporteur)
Gautier, François,	Prof. des universités,	Université du Maine	(Rapporteur)
Moorhouse, Andy,	Professor, (Reader),	University of Salford (UK)	(Rapporteur)

Laboratoire Vibrations Acoustique

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mes directeurs de thèse opérationnels Bernard Laulagnet et Charles Pézerat, grâce à qui j'ai pu acquérir au cours de mes années de doctorat (il y a dix ans déjà...) l'envie et la possibilité de me lancer dans une carrière universitaire. Je remercie Jean-Louis Guyader, mon directeur de thèse officiel et directeur de laboratoire, pour m'avoir permis de réaliser mes travaux de recherche en toute sérénité dans des conditions de travail idéales, au sein du Laboratoire Vibrations Acoustique de l'INSA de Lyon. Je remercie également l'ensemble des étudiants que j'ai eu l'occasion d'encadrer pour tout ce qu'ils m'ont apporté sur le plan scientifique et humain, je citerai en particulier mes doctorants Laurent Pruvost, Julie Drouet, Antonio Pereira, Rémy Dejaeger et Yu Liang. Je remercie l'ensemble des membres du laboratoire, avec une attention particulière pour les personnes avec qui j'ai eu l'occasion de travailler sur des projets de recherche : Céline Sandier, Etienne Parizet, Nacer Hamzaoui, Jérôme Antoni, Goran Pavic, Emmanuel Redon, Nicolas Totaro, Kerem Ege, François Girardin. Merci également à l'ensemble des personnels administratifs et techniques de l'INSA, particulièrement Nathalie Lorient, Meriem Laboune, Antoine Godoy, Daniel Renaud et Corine Iafrate.

Je dois également exprimer ma gratitude à l'ensemble des collègues universitaires extérieurs au LVA avec qui j'ai eu la chance de travailler : Bert Roozen, Efrén Fernandez-Grande, Constantin Onescu, Jean-Loïc Le Carrou, Marc Pachebat, Didier Rémond, Stéphane Farget, Fabrice Casset, Gilles Robert, Pascal Souchotte et bien sûr l'ensemble du comité d'organisation du CFA 2010.

Un grand merci aux industriels avec qui j'ai pu nouer des relations sur le long terme, Laurent Polac, Lucille Lamotte, Fabien Chevillotte, Olivier Sauvage, Bernard Béguet, Frédéric Pichot, Laurent Bleanou.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury de ma soutenance de HDR, en premier lieu les rapporteurs Alexandre Garcia, François Gautier et Andy Moorhouse pour avoir consacré du temps à la relecture de ce document, ainsi que Jérôme Antoni, Jean-Christophe Béra et Emmanuel Foltête pour leur participation et la sympathie qu'ils m'ont témoigné à l'occasion de la soutenance.

Je remercie finalement ma famille, Claire, Augustin, Elodie et Céleste, pour leur présence à mes côtés.

Table des matières

Introduction	5
1 Outils de traitement du signal appliqués à la séparation de sources	9
1.1 Dénombrement et séparation de sources par analyse spectrale multi-voies .	9
1.1.1 Contexte scientifique	9
1.1.2 Mises en œuvre expérimentales de l'ASC et ASP, études de cas . . .	12
1.1.3 Analyse spectrale multi-voies de mesures réalisées en plusieurs passes	17
1.2 Application de la cyclo-stationnarité à la séparation de sources	20
1.2.1 Filtrage de Wiener appliqué à l'extraction du bruit de combustion Diesel	20
1.2.2 contribution à l'étude des processus cyclo-stationnaires flous	25
2 Méthodes inverses pour l'identification de sources vibratoires	27
2.1 Analyse des voies de transfert par mesure indirecte d'efforts	28
2.1.1 contexte scientifique	28
2.1.2 Correction par pondération gauche de la matrice de transfert	29
2.1.3 Méthode des moindres carrés totaux appliquée à la mesure indirecte d'efforts	29
2.1.4 Correction par pondération droite de la matrice de transfert	30
2.1.5 Applications industrielles	31
2.2 Analyse opérationnelle des voies de transfert	32
2.3 Localisation et quantification de sources vibratoires par la méthode RIFF .	34
2.3.1 Utilisation de capteurs de vitesse acoustique pour la méthode RIFF	34
2.3.2 Correction des schémas aux différences finies pour la méthode RIFF	36
3 Caractérisation expérimentale du champ acoustique pour l'identification de sources sonores	39
3.1 Mesure du champ acoustique par vibrométrie laser	40
3.1.1 Utilisation d'une membrane ultra légère pour mesurer le champ de vitesse acoustique	40
3.1.2 Mesure du champ de pression acoustique par réfractovibrométrie . .	40
3.2 contribution aux méthodes d'holographie acoustique	44
3.2.1 Atténuation des effets de fenêtrage spatial par extrapolation du champ acoustique	45

3.2.2	Holographie acoustique basée sur la mesure du champ de vitesse acoustique	46
3.2.3	Correction de la masse surfacique d'une membrane	47
3.2.4	Intensimétrie supersonique	48
3.3	contribution aux méthodes d'imagerie par sources équivalentes	50
3.3.1	Résolution d'un problème inverse largement sous déterminée	50
3.3.2	Application à l'antennerie sphérique	52
	Projets et perspectives	57
	Liste des partenaires académiques et industriels	60
	Bibliographie	63

Introduction

L'objectif de ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches est de retracer mon parcours scientifique au LVA (Laboratoire Vibrations Acoustique) de l'INSA de Lyon autour de la problématique de caractérisation de sources vibro-acoustiques. Le titre choisi, *Caractérisation expérimentale des sources vibratoires et acoustiques*, désigne un domaine de recherche appliquée relativement vaste de par la relative indétermination des termes *caractérisation* et *source*, dont la signification peut varier suivant le contexte dans lequel ils sont employés. Les deux paragraphes qui suivent tentent de décliner l'ensemble des sens que l'on peut donner à ces deux termes, dans le but de présenter un panorama général de la problématique abordée.

Caractérisation

Le mot caractérisation, lorsqu'il est employé à propos d'une source sonore, est un terme générique dont la signification se décline selon de nombreuses possibilités. L'objet considéré peut tout d'abord avoir pour fonction principale d'être une source, qu'il s'agisse de transducteurs ou d'instruments de musique. Leur caractérisation impliquera alors une étude de la directivité de leur rayonnement ou de leur performance, établie selon différents critères objectifs ou subjectifs propres à chaque type d'objet. Dans le cas d'un produit manufacturé soumis à une normalisation, la caractérisation aura pour objectif d'établir un niveau de puissance acoustique, sinon tout autre indicateur permettant d'établir ses performances acoustiques vis à vis de la norme en vigueur. Dans le cadre d'une démarche de réduction de bruit, la caractérisation de source interviendra comme une étape de diagnostic ayant pour but d'établir une identification des sources vibratoires ou acoustiques, leur quantification, ainsi que d'établir une hiérarchisation des voies de passage du bruit. En cas de source complexes, constituée de différents éléments internes bruyants, la caractérisation peut signifier un dénombrement des sources élémentaires en présence, une séparation de leurs contributions sonores et leur hiérarchisation. Dans une démarche de surveillance des machines, la caractérisation aura pour but d'identifier les défauts à l'origine d'un comportement vibratoire ou acoustique particulier. On pourra également s'intéresser à la détermination des niveaux de confort ou de gêne induits par une source vibro-acoustique, qui pourront être déterminés en mettant en place des tests perceptifs.

Caractériser une source vibro-acoustique nécessite finalement la mise en œuvre d'investigations expérimentales, dont la nature et la complexité dépendent du contexte, de la source étudiée et des objectifs visés. Dans certains cas, les protocoles expérimentaux sont clairement établis, faisant l'objet de normes de mesure. Mais bien souvent, la problématique rencontrée nécessite le développement d'approches originales et la mise au point de

méthodologies particulières.

Notion de source

La notion de source en vibro-acoustique est, tout comme le terme caractérisation, un concept générique n'ayant pas de définition précise. D'une manière générale, l'idée de source rassemble toute entité (cause) pouvant être désignée comme responsable des phénomènes vibratoires et acoustiques observés (effets), et dépend en premier lieu du point de vu de l'observateur. Prenons l'exemple du son produit par un musicien jouant sur une guitare électrique reliée à un système de sonorisation. La source à l'origine du son produit dans la salle de concert est le haut-parleur du système de sonorisation, ce qui n'empêchera pas le spectateur de considérer que la source est le guitariste lui-même. Pour le régisseur son, la source guitare est un simple signal électrique arrivant sur la table de mixage, qu'il aura pour mission d'amplifier et de filtrer de manière adéquate. Quand au musicien lui-même, il peut considérer que la source est la partition ou le thème à interpréter, qu'il soit prédéfini ou improvisé. Pour le fabricant des micros montés sur la guitare, la source est la corde vibrante, dont le mouvement est à l'origine du courant induit dans la bobine, tandis que le mouvement de la corde a pour source les efforts générés par le jeu du guitariste, etc... D'une manière générale, la source vibro-acoustique désignera l'ensemble des éléments extérieurs au système considéré responsable de son comportement acoustique ou vibratoire. Le système considéré est donc étroitement lié à la notion de source, ce qui renvoie à la notion de position de l'observateur.

On pourrait considérer qu'une source doit posséder des caractéristiques intrinsèques, injectant des efforts pas ou peu modifiés par le comportement du récepteur. C'est cependant faux dans de nombreux cas : les effets de couplage source-récepteur agissent souvent au premier ordre sur le comportement vibro-acoustique global. Dans ce cas, la caractérisation de la source passera par la détermination de son comportement face à un système soit infiniment souple (vitesses libres, efforts de couplage nuls) ou au contraire infiniment rigide (vitesses nulles, efforts bloqués), ainsi que par sa réponse aux efforts de couplage (impédance de source).

Les sources sont souvent définies par le phénomène physique à l'origine des vibrations ou du bruit observés : contact (chocs mécaniques, frottements), écoulement turbulent, combustion, cavitation, efforts d'inertie, endommagement.... Elles peuvent être également désignées par un organe particulier : alternateur, pompe, ventilateur, moteur... D'un point de vue statistique, deux sources seront considérées comme différentes si elles sont indépendantes, tandis que dans une démarche de localisation les sources seront différenciées si elle se situent à des endroits différents. La terminologie utilisée dépend donc à la fois de la démarche de caractérisation adoptée et des outils de séparation appliqués.

Structure du document

Ce document est structuré en trois chapitres : le premier est consacré à l'utilisation d'outils de traitement du signal pour le dénombrement et la séparation de sources, le second aux méthodes d'identification de sources vibratoires et le troisième est dédié à la

caractérisation des champs acoustiques appliquée à l'identification de sources sonores. Le traitement du signal est un aspect incontournable des méthodes expérimentales, et de nombreux outils sont dédiés à la problématique de séparation de sources. Dans le premier chapitre de ce document seront abordées dans un premier temps les méthodes d'analyse spectrale multi-voies, l'analyse conditionnée et l'analyse en sources virtuelles. Ces méthodes peuvent être vues comme de simple 'post-traitements' de mesures permettant la mise en forme des données pour l'application de méthodes telles que celles décrites dans les chapitres 2 et 3. Elles fournissent cependant des informations fondamentales sur les propriétés de la source étudiée, et constituent un véritable outil de diagnostic. La seconde partie du premier chapitre est consacrée à l'utilisation pour la séparation de sources de la cyclostationnarité, propriété des signaux acoustiques et vibratoires générés par les machines tournantes.

Le second chapitre décline différentes méthodes d'identification de sources vibratoires, en partant des méthodes de mesure indirecte d'efforts, étudiées au cours de mon travail de thèse, pour finir par la méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée), pour laquelle plusieurs développements ont été proposés à la fois en terme de mesure (utilisation d'antennes de sondes de vitesse acoustique) et de méthodologie (correction de la réponse du schéma RIFF dans le domaine des nombres d'ondes). Une partie de ce chapitre est consacrée également à des contributions apportées aux méthodes d'analyse de voies de transfert classiques ou opérationnelles, basées respectivement sur les systèmes de transfert ou de transmissibilité.

Le chapitre 3 est consacré à la caractérisation expérimentale des champs acoustiques, à des fins d'identification de sources sonores. Une première partie concerne l'utilisation de la vibrométrie laser, utilisée en principe dans le cas de mesures vibratoires, pour la mesure de champs acoustiques. Cela peut être fait soit en utilisant une membrane ultra légère, permettant une mesure presque directe de la vitesse acoustique, soit par réflectovibrométrie, qui permet d'estimer la pression acoustique dans le milieu traversé par le faisceau. Une seconde partie est dédiée à un certain nombre de développements étudiés dans le cadre de l'holographie en champ proche basée sur la transformée de Fourier 2D, tels que la correction de la masse de membrane en cas de mesure au vibromètre laser, ou l'extrapolation du champ mesuré pour atténuer les effets de troncature spatiale. La notion d'intensimétrie supersonique est également abordée, permettant d'identifier dans un champ particulièrement réactif les sources responsables du champ propagé. La dernière partie aborde la problématique d'imagerie acoustique par sources équivalentes, qui permet de construire une distribution de sources élémentaires sur la surface ou dans le volume de la source réelle qui génère un champ acoustique équivalent au champ mesuré. Plusieurs applications sont présentées, comme la harpe de concert ou le moteur Diesel, qui illustrent la pertinence et la robustesse de l'approche originale proposée. L'extension de cette méthode à l'antennerie sphérique est présentée dans la dernière partie de ce mémoire.

Ce document a été organisé autour de contributions apportées aux méthodologies de caractérisation de sources vibratoires et acoustiques, illustrées par des cas d'application sur diverses sources académiques et industrielles. Certains travaux concernant l'étude de sources particulières ont volontairement été laissés de côté pour conserver une cohérence globale à ce

rapport. On peut citer notamment l'étude des haut-parleurs digitaux, menée conjointement avec le CEA LETI. Cette collaboration, initiée en 2009 dans le cadre du stage de master de Rémy Dejaeger [DEA5], c'est poursuivie par une thèse financée par le CEA LETI et suivie au LVA (plusieurs communications en congrès ont été réalisées [CN10, C31]). Cette collaboration a été formalisée en 2012 dans le cadre du projet SONAT [E3], qui financera entre autre un post-doctorant pour une durée de 18 mois. Une photographie de haut-parleurs digitaux MEMS, composés de matrices de speaklets élémentaires de différentes tailles, est donnée en figure 1.

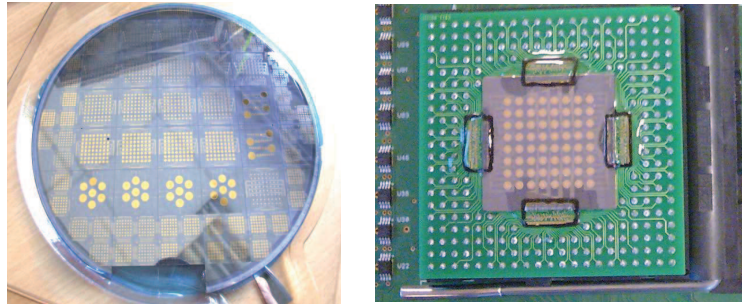


FIGURE 1 – Réalisations de matrices de speaklets MEMS pour haut-parleurs digitaux. A gauche : wafer contenant plusieurs agencements et plusieurs tailles de speaklets. A droite : matrice de 8*8 speaklets connectée à la carte de pilotage. Tiré de [C31]

On peut également citer une étude réalisée pour le compte d'un luthier [PFE9] dans le cadre d'une démarche d'innovation qui a conduit l'artisan à un dépôt de brevet. Il s'agissait de comprendre le comportement d'une corde vibrante sollicitée par un plectre, qui constitue une condition d'excitation particulière à mi-chemin entre la corde pincée et la corde frappée ([CN9], cf. figure 2).

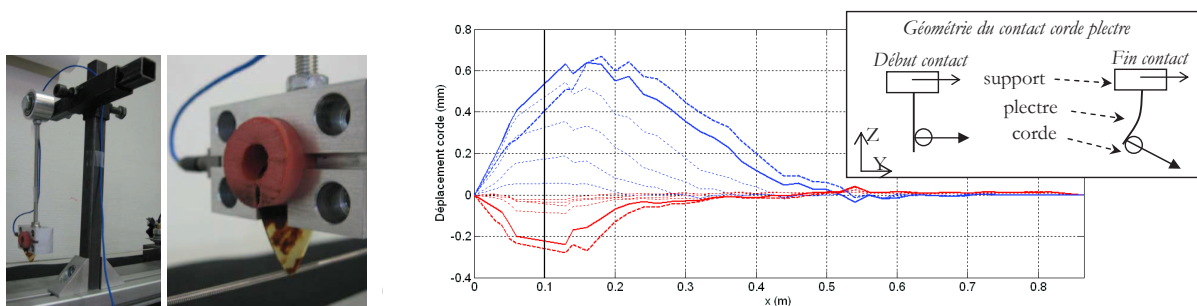


FIGURE 2 – A gauche : Système d'excitation par plectre à balancier. A droite : déformées de la corde dans deux plans pendant le contact corde-plectre toutes les 0.6ms (pointillés fins), au lâcher (traits pleins) et 0.3ms après le lâcher (tirets gras). La position de l'excitation est symbolisée par le trait noir vertical. Tiré de [CN9]

Chapitre 1

Outils de traitement du signal appliqués à la séparation de sources

1.1 Dénombrement et séparation de sources par analyse spectrale multi-voies

Publications & communications : [P2, P6, PN3, C4, CN4, CN6]

Collaboration(s) industrielle(s) : Renault [R1, R2], CETIAT [DEA1], CETIM [DEA2, PFE2]

Encadrement(s) : [DEA1, DEA2, DEA4, PFE2]

1.1.1 Contexte scientifique

L'analyse spectrale multi-voies se base sur l'acquisition simultanée de plusieurs signaux délivrés par des capteurs positionnés sur l'objet étudié. Lorsque cet objet fonctionne dans des conditions stabilisées, les résultats d'estimation d'autospectres et interspectres moyennés par périodogramme convergent. Dans ce document, nous utiliserons la définition suivante des autospectres et interspectres :

$$S_{pq}(f) = \langle X_p(f) \overline{X_q(f)} \rangle_m$$

où $X_p(f)$ représente l'amplitude complexe de la Transformée de Fourier Discrète du signal de la voie p sur une durée T , et $\langle \rangle_m$ l'opération de moyennage sur m réalisations. On note que cette définition diffère de celle qu'on peut trouver dans la littérature de référence¹, qui place le conjugué sur le premier terme. Nous préférons cependant cette définition qui simplifie l'expression des équations sans altérer la signification de l'interspectre.

Les autospectres et interspectres ainsi estimés sont de nature discrète en fréquence, leur résolution est $1/T$. Ces quantités peuvent être rassemblées sous la forme d'une matrice interspectrale (on omettra la dépendance en fréquence pour la suite) :

1. J.S. Bendat and A.G. Piersol. *Engineering applications of correlation and spectral analysis* Wiley-Interscience, New York, 1980.

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \langle \mathbf{X}\mathbf{X}' \rangle_m = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix}$$

où S_{pq} ($p \neq q$) est l'interspectre entre les voies p et q , S_{pp} l'autospectre de la voie p , et où \mathbf{X}' désigne la transposée hermitienne de \mathbf{X} . Cette matrice a pour propriété d'être hermitienne, c'est à dire égale à sa transposée hermitienne, car $S_{pq} = \bar{S}_{qp}$.

L'opération de moyennage est fondamentale car elle permet de révéler la nature aléatoire ou déterminée de la différence de phase entre les composantes de Fourier des signaux. L'interspectre peut s'écrire

$$S_{pq}(f) = \langle |X_p| |X_q| \exp(i(\arg(X_p) - \arg(X_q))) \rangle_m$$

Si la différence de phase est aléatoire à chaque réalisation, alors l'espérance de l'interspectre est nulle. Si la différence de phase est stable d'une réalisation à l'autre, alors le module au carré de l'interspectre est égal au produit des autospectres $S_{pp}S_{qq}$. La fonction de cohérence traduit cette analyse :

$$\gamma_{pq}^2 = \frac{|S_{pq}|^2}{S_{pp}S_{qq}}$$

Si la cohérence est égale à 1, la relation entre les deux signaux est linéaire. Si la cohérence est nulle, les deux signaux sont indépendants. Si la cohérence est significativement non nulle, mais pas égale à 1 cela signifie qu'il existe une relation linéaire mais qu'un bruit additionnel participe à l'un ou l'autre des signaux.

Il existe principalement deux approches permettant de traiter les informations contenues dans la matrice interspectrale, dans le but de faire de l'analyse de sources. La première correspond à une approche supervisée, pour laquelle une partie des voies représentent les sources considérées, dont on souhaite séparer les contributions sur les voies restantes. Il s'agit de l'Analyse Spectrale Conditionnée (ASC) proposée par Bendat à la fin des années 70². La seconde, l'Analyse Spectrale en Composantes Principales (ASP), est apparentée aux approches dites non-supervisées. Les sources sont recherchées en aveugle, c'est à dire sans signaux de référence. Cette méthode a été proposée par Price et Bernhard³, sous l'appellation d'analyse en sources virtuelles.

Analyse Spectrale Conditionnée (ASC)

L'idée est de considérer tout d'abord la relation linéaire entre l'ensemble des voies et une voie dite de référence a (il s'agit ici d'un estimateur de type H1) :

$$\frac{\mathbf{X}}{X_a} = \frac{\mathbf{S}_{\mathbf{X}a}}{S_{aa}}$$

2. J.S. Bendat. Solutions for the multiple input/output problem. *Journal of Sound and Vibration*, 44(3) :311–325, 1976.

3. S.M. Price and R.J. Bernhard. Virtual coherence : A digital signal processing technique for incoherent source identification. In *Proceedings of IMAC 4*, Schenectady, NY, USA, 1986.

où $\mathbf{S}_{\mathbf{X}_a}$ correspond à la colonne a de la matrice interspectrale :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}_a} = \begin{bmatrix} S_{1a} \\ S_{2a} \\ \dots \\ S_{na} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Il est possible de construire d'après cette relation linéaire un vecteur \mathbf{X}_a qui représente la contribution complexe du processus représenté par la voie a sur l'ensemble des signaux :

$$\mathbf{X}_a = \frac{\mathbf{S}_{\mathbf{X}_a}}{\sqrt{S_{aa}}} \quad (1.2)$$

La matrice interspectrale dite "conditionnée" par la voie a est ensuite obtenue en soustrayant la contribution du processus a :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}.a} = \mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} - \mathbf{X}_a \mathbf{X}'_a$$

Soit, pour chaque élément de $\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}.a}$,

$$S_{ij.a} = S_{ij} - \frac{S_{ia}S_{aj}}{S_{aa}}$$

On peut extraire dans un deuxième temps de cette matrice interspectrale conditionnée la relation linéaire entre l'ensemble des voies et une deuxième voie de référence :

$$\mathbf{X}_{b.a} = \frac{\mathbf{S}_{\mathbf{X}b.a}}{\sqrt{S_{bb.a}}}$$

qui représente la contribution complexe du processus représenté par la voie b sur l'ensemble des voies conditionnés. La matrice interspectrale conditionnée par les voies a et b est ensuite obtenue en soustrayant la contribution du processus b :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}.a,b} = \mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}.a} - \mathbf{X}_{b.a} \mathbf{X}'_{b.a}$$

L'ASC peut ainsi être réalisée en cascade sur l'ensemble des voies de référence. La matrice interspectrale est finalement décomposée de la manière suivante :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{X}_a \mathbf{X}'_a + \mathbf{X}_{b.a} \mathbf{X}'_{b.a} + \mathbf{X}_{c.a,b} \mathbf{X}'_{c.a,b} \dots$$

Il faut noter que le choix des références peut être fait de manière totalement arbitraire, et même sur l'ensemble des voies, si l'objectif est juste la décomposition des données mesurées en un ensemble de processus décorrés.

Analyse Spectrale en Composantes Principales (ASP)

L'ASP se base sur une décomposition propre de la matrice interspectrale :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{\Psi} \mathbf{\Sigma} \mathbf{\Psi}^*$$

On identifie dans cette relation un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) où $\mathbf{\Sigma}$ (matrice diagonale des valeurs propres positives) représente la matrice interspectrale

des entrées et Ψ (vecteurs propres) les fonctions de transfert. L'intérêt est que la matrice interspectrale ainsi construite est diagonale, les entrées du système sont décorréées. L'ASP permet dans un premier temps de déterminer le nombre de sources décorréées participant à la réponse globale. Les valeurs propres non significatives, c'est à dire ayant une contribution négligeable sur la matrice interspectrale, pourront être simplement supprimées.

Il est possible ensuite d'exprimer la contribution complexe de la source i sur l'ensemble des voies :

$$\mathbf{X}_i = \Psi_i \sqrt{\Sigma_i}$$

La matrice interspectrale est finalement décomposée comme suit

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{X}_1 \mathbf{X}'_1 + \mathbf{X}_2 \mathbf{X}'_2 + \mathbf{X}_3 \mathbf{X}'_3 + \dots$$

La cohérence virtuelle entre les voies et les sources virtuelles est définie par

$$\gamma_{vi}^2 = \frac{|X_{ji}|^2}{S_{jj}}$$

1.1.2 Mises en œuvre expérimentales de l'ASC et ASP, études de cas

Les méthodes d'analyse spectrale multi-voies peuvent se révéler de puissants outils de caractérisation, elle sont cependant encore peu employées dans l'industrie. La principale raison expliquant cet état de fait tient à la nécessité d'avoir des sources relativement décorréées. Les nombreuses applications expérimentales réalisées au LVA sont autant

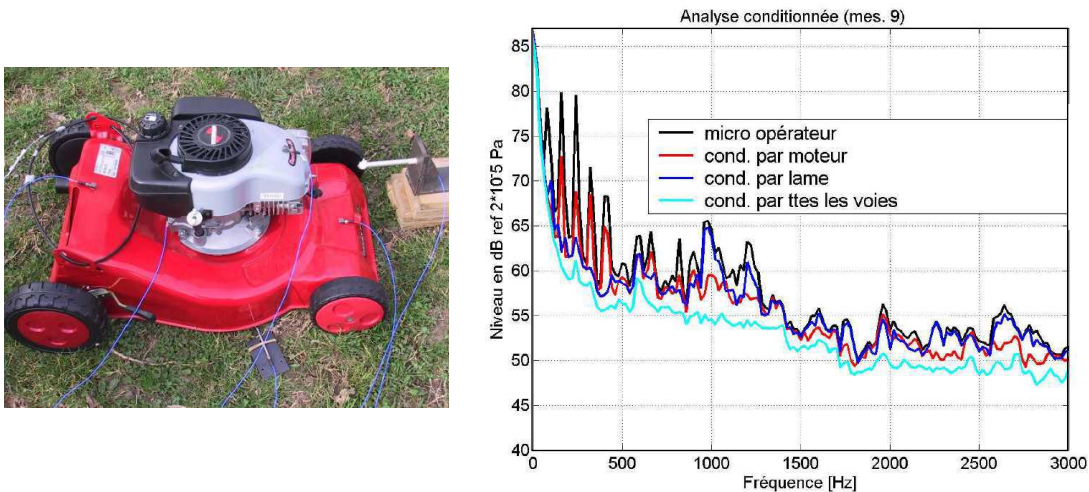


FIGURE 1.1 – A gauche : tondeuse à gazon étudiée et capteurs de référence. A droite : spectre du bruit de tondeuse (noir). Spectre conditionné par la référence accéléromètre moteur (rouge), par la référence microphonique pales (bleu), par les deux références (cyan). (tiré de [PFE2])

d'illustrations de l'intérêt et du potentiel des méthodologies ASC et ASP. Les méthodes ont été appliquées à l'étude d'une machine frigorifique dans le cadre d'un contrat avec le

CETIAT (stage de master de F. Denard [DEA1]), ou encore du bruit de tondeuse pour le CETIM (projet de fin d'études de Jessica Fromell et Guillaume Pouvillon [PFE2]), cf. figure 1.1.

D'autres études ont été conduites dans le cadre de contrats avec Renault [R2, R5] , sur la caractérisation vibro-acoustique des moteurs thermiques. Ces cas font l'objet des deux sections suivantes, qui reviennent sur les méthodologies mises en œuvre et les résultats obtenus.

Diagnostic vibratoire d'un moteur Diesel

L'ASC et l'ASP ont été appliquées avec succès dans un processus d'identification de sources sur moteur Diesel [P3], dans le cadre d'un contrat réalisé pour le compte de Renault [R2]. L'objectif de cette étude était d'identifier la source d'un bruit perçu au ralenti dans l'habitacle du véhicule aux alentours de 1kHz.

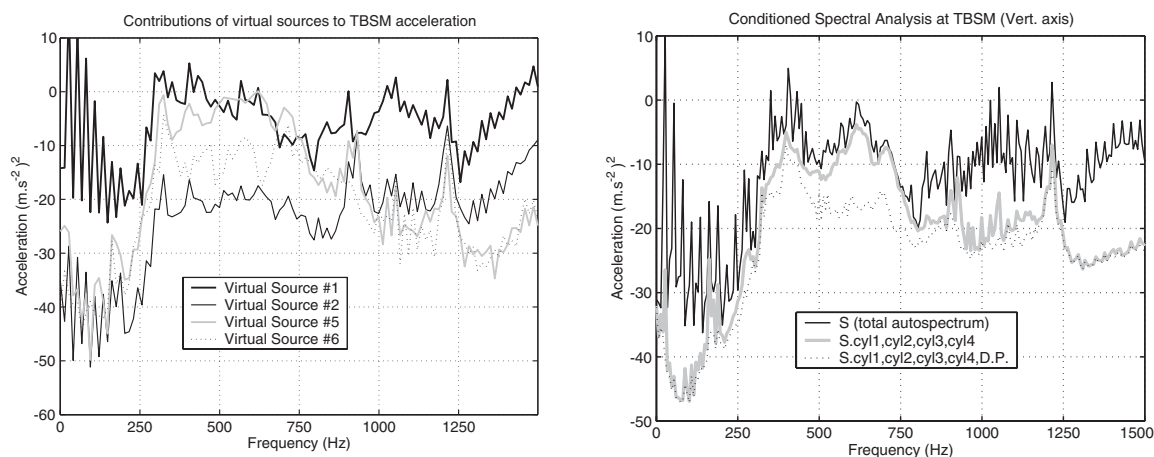


FIGURE 1.2 – A gauche : Contributions des sources virtuelles à l'accélération support moteur. A droite : Analyse conditionnée du signal d'accélération support moteur. Tiré de [P2]

Plusieurs capteurs ont été placés sur les sources potentielles du moteur, y compris les combustions, pour lesquelles des capteurs de pression cylindre étaient implantés. Des accéléromètres étaient placés au niveau des supports moteurs, représentatifs du bruit solide transmis à la caisse puis à l'habitacle. Une ASP a été conduite, permettant d'obtenir les contributions des sources virtuelles au niveau de l'accélération support moteur. Les résultats sont présentés sur la figure 1.2 (à gauche), sur laquelle seules les sources virtuelles contribuant à plus de 1% du niveau global sont représentées.

On apprécie sur cette figure le nombre de sources virtuelles contribuant de manière significative à la réponse en fonction de la fréquence. On identifie notamment la présence de plusieurs sources sur les fréquences caractéristiques de la source de bruit recherchée au alentours de 900Hz et 1200Hz. L'étape suivante est d'établir un lien entre sources virtuelles et capteurs de référence. Cela peut être fait par l'intermédiaire de diagrammes de signatures, qui représentent les cohérences entre sources virtuelles et signaux de référence. Ces

diagrammes sont tracés pour les deux sources virtuelles prépondérantes sur la figure 1.3. L'inspection de ces diagrammes permet d'identifier le ou les signaux de références les plus

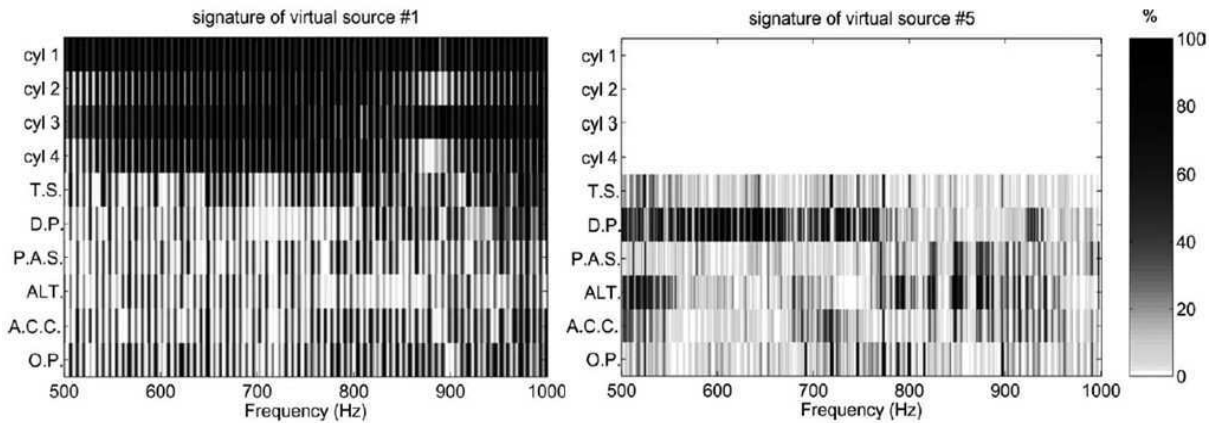


FIGURE 1.3 – Diagrammes de signature des sources virtuelles prépondérantes (tiré de [P2])

cohérents avec la source virtuelle étudiée. La source virtuelle 1 est fortement cohérente avec de nombreux capteurs de référence, et particulièrement les pressions cylindres. La source virtuelle 5 est elle beaucoup moins distribuée : elle est notamment fortement cohérente avec la pompe gazole aux fréquences incriminées.

Pour confirmer ce résultat, une analyse conditionnée en cascade est réalisée. L'accélération support moteur est tracée sur la figure 1.2 (à droite) pour le signal brut, le signal conditionné par les 4 pressions cylindres, et le signal conditionné par les 4 pressions cylindres et la pompe gazole. Le premier conditionnement supprime toute l'énergie cohérente avec les pressions cylindres, le second conditionnement supprime en plus la part cohérente avec la pompe gazole. Le conditionnement doit être fait dans ce sens particulier, car si les signaux de pressions cylindres peuvent être supposés non contaminés par le bruit propre de la pompe gazole, l'inverse est forcément faux. Le signal de référence pour la pompe étant un accéléromètre, il capte également la réponse du bloc moteur aux excitations de combustion. Le premier conditionnement retire une part majeure de l'énergie, sauf aux fréquences caractéristiques du bruit dont on cherche l'origine. Le conditionnement additionnel par la pompe gazole permet d'atténuer significativement le niveau à ces fréquences particulières, confirmant l'identification de la pompe gazole comme source du bruit étudié.

Diagnostic acoustique d'un moteur essence

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un contrat avec Renault [R5], et a fait l'objet d'une communication en congrès [CN6] publiée dans la revue du CIDB Acoustique & Technique [PN3]. Une méthodologie particulière a été élaborée pour cette étude, qui visait à utiliser les méthodes ASC et ASP pour identifier les sources de bruit d'un moteur essence. La particularité du moteur essence, par rapport au moteur Diesel, est que les pressions de combustion sont beaucoup moins fortes, et ne constituent pas la source principale du bruit rayonné. Les sources secondaires deviennent prépondérantes, et leur relative indépendance permet de les séparer plus efficacement par analyse spectrale.

Un dôme de mesure de 16 microphones a été placé autour du moteur, à une distance moyenne de 1m, afin d'avoir une information globale de son rayonnement acoustique. Des capteurs de référence ont été placés dans le même temps sur les différentes sources potentielles du moteur cf. figure 1.4. Une optimisation du choix et du positionnement des



FIGURE 1.4 – A gauche : dôme de mesure autour du moteur essence étudié. A droite : exemples de capteurs de référence : en haut : accéléromètres collecteur d'admission. En bas : microphone courroie et accéléromètres alternateur.

capteurs références est une étape importante, il s'agit de maximiser l'énergie des microphones du dôme cohérente avec l'ensemble des références. Une ASP est ensuite conduite sur les microphones du dôme de mesure, de manière à décomposer le champ acoustique rayonné en contributions de sources virtuelles incohérentes ; cela permet d'isoler à chaque fréquence le processus prépondérant. Un diagramme composé des cohérences virtuelles entre chaque capteur de référence et le processus prépondérant permet dans certains cas d'identifier la source physique associée. Un exemple est présenté sur la figure 1.5, qui présente le spectre moyen des pressions acoustiques, la contribution du processus prépondérant et le diagramme des cohérences virtuelles.

On identifie clairement sur ce type de diagramme les références les plus représentatives du processus prépondérant, comme le support de coiffe et le carter de distribution entre 1400 et 1500 Hz, et un brin de courroie au voisinage de l'alternateur à 2400Hz.

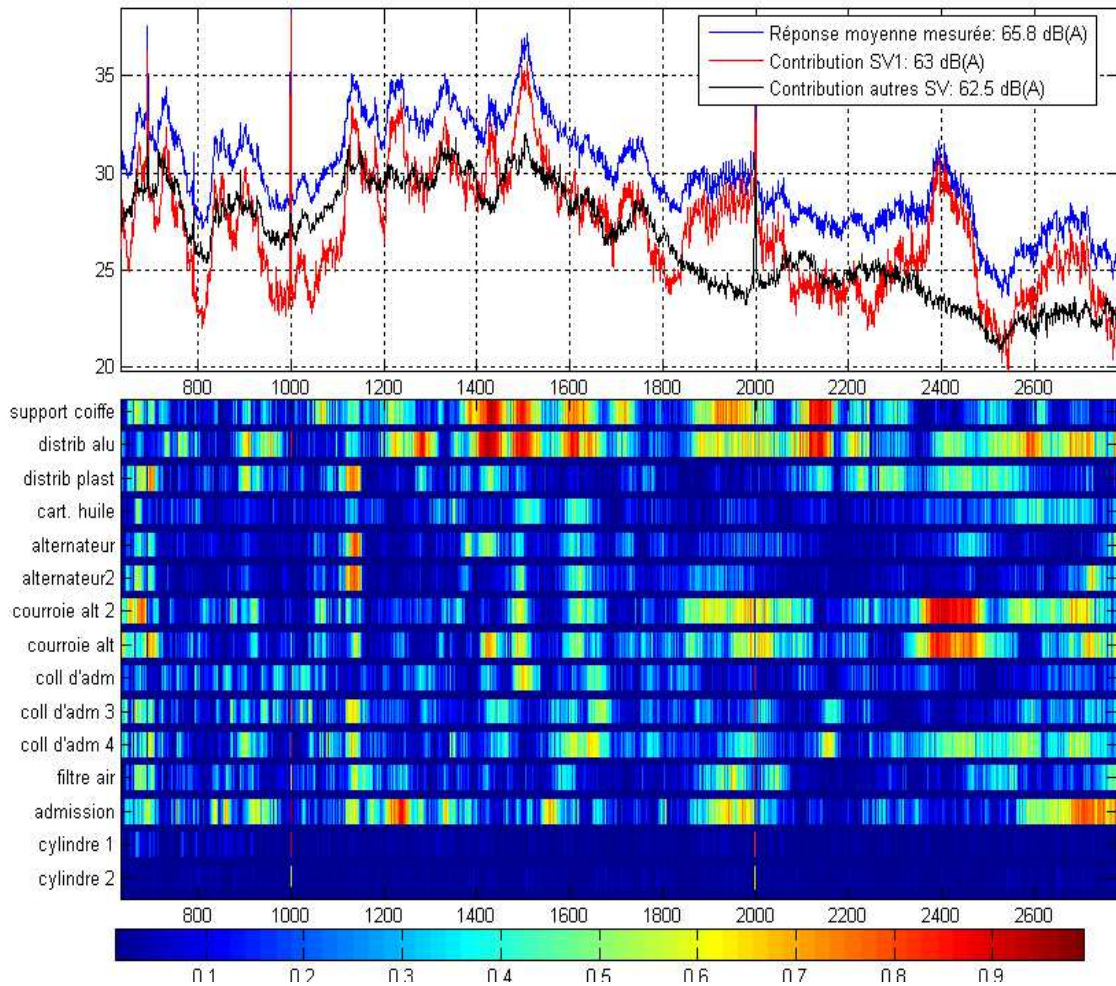


FIGURE 1.5 – En haut : spectre du bruit rayonné moyenné sur l’ensemble des microphones (bleu), contribution du processus prépondérant (rouge), résidu (noir). En bas : diagramme des cohérences virtuelles entre les capteurs de référence et le processus prépondérant.

Une limitation de cette approche réside en la prise en compte de sources statistiquement complexes, générées par exemple par les écoulements turbulents. Dans le cas des moteurs essence, le collecteur d’admission est un bon exemple : l’écoulement de l’air génère un champ vibratoire du collecteur est alors statistiquement complexe, ainsi que son rayonnement. Il est alors difficile de représenter cette source avec un seul capteur de référence, il devient nécessaire de les multiplier (cf. figure 1.4). Ces aspects ont notamment été étudiés à l’occasion du stage de DEA de Xavier Thomas [DEA4], dont l’objectif était de déterminer le nombre de capteurs de référence à utiliser pour représenter correctement le bruit du collecteur d’admission.

1.1.3 Analyse spectrale multi-voies de mesures réalisées en plusieurs passes

De nombreuses méthodes de caractérisation acoustique ou vibratoire nécessitent que les données issues des mesures soient disponibles sous la forme de spectres complexes. Généralement, quand l'objet étudié fonctionne en conditions stabilisées, on a recours à la méthode du périodogramme, qui moyenne les autospectres et interspectres sur plusieurs fenêtres temporelles. Il y a donc une étape consistant à transformer ces données de mesures en données compatibles avec la méthodologie mise en œuvre.

Lorsque l'ensemble des voies d'acquisition sont fortement cohérentes entre elles (cohérence voisine de l'unité), cela signifie qu'une seule source sollicite le système étudié, ou que l'ensemble des sources sont cohérentes entre elles. Dans ce cas, on peut choisir une des voies d'acquisition comme référence de phase. Le vecteur des spectres complexes est alors obtenu via l'équation (1.2), qui nécessite l'estimation des interspectres entre chaque voie et la voie de référence, ainsi que de l'autospectre de la voie de référence. Cela peut être fait en une acquisition simultanée de l'ensemble des voies, mais également en plusieurs passes, chaque passe permettant d'estimer l'interspectre entre le capteur de référence (fixe pour l'ensemble des passes) et un autre capteur dont la position change d'une passe à l'autre.

Si les voies d'acquisition ne sont pas cohérentes entre elles (cohérence inférieure à 1), alors le comportement du système étudié ne peut pas être représenté par un seul vecteur de spectres complexes, car plusieurs processus incohérent participent à la réponse globale. On peut alors avoir recours aux méthodes d'analyse multi-voies ASC et ASP présentées précédemment pour extraire de la matrice interspectrale un certain nombre de vecteurs de spectres complexes caractérisant plusieurs processus incohérent participant au comportement vibratoire du système étudié.

Ce type d'approche est appliqué de manière quasi-systématique dans l'ensemble des travaux d'identification de sources vibratoire ([P3, C16]) ou acoustiques ([R4] [DEA4]) décrites dans les deux chapitres suivant. Les méthodes ASC et ASP peuvent être considérées comme simples outils de post-traitement de mesures, apportant néanmoins une certaine valeur ajoutée en terme d'analyse.

Une difficulté apparaît lorsqu'on doit avoir recours à ce type d'approche sur une mesure réalisée en plusieurs passes. En effet, il peut arriver qu'une mesure multi-voies ne puisse pas être réalisée autrement qu'en plusieurs passes, c'est le cas lorsqu'on a recours à un maillage de mesure réalisé à l'aide d'un robot ou d'un laser à balayage. C'est également le cas lorsque les limites du système d'acquisition utilisé ne permettent pas l'acquisition simultanée de tous les signaux. Dans cette situation, l'acquisition de l'intégralité de la matrice interspectrale n'est pas réalisable, tout simplement parce qu'un certain nombre de couples de points de mesures ne font pas l'objet d'une acquisition simultanée. On a donc

accès à une matrice interspectrale partielle :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{XR}} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1r} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2r} \\ & & \dots & \\ S_{r1} & S_{r2} & \dots & S_{rr} \\ & & \dots & \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nr} \end{bmatrix}$$

où les r premières voies représentent des capteurs de référence, gardant la même position d'une acquisition à l'autre, et les $n - r$ suivantes représentent les capteurs mobiles, changeant de position à chaque passe de mesure. L'exploitation de résultats de mesure sous cette forme a été abordée lors du stage de DEA de Philippe Zvequintzoff [DEA2], qui avait pour objet l'étude du rayonnement acoustique d'un silencieux d'échappement. Lors de ce stage, des méthodes issues de la littérature ont été appliquées, basées notamment sur l'analyse en valeurs singulière de la matrice interspectrale partielle. Une analyse conditionnée peut également être conduite, par rapport à l'ensemble des voies de référence, successivement. Cependant, les données interspectrales des références diffèrent des données interspectrales entre références et capteurs mobiles, dans le sens où elles sont mesurées pour chaque passe d'acquisition. Si les mesures sont réalisées en N passes, les signaux des références sont acquis sur une durée totale égale à N fois la durée d'acquisition d'une passe. L'estimation des autospectres et interspectres de référence est donc plus précise que l'estimation des interspectres et autospectres des voies mobiles. Les largeurs des intervalles de confiance des estimateurs inter-spectraux évoluent en effet en $1/\sqrt{n}$, où n représente le nombre de fenêtres utilisées pour la moyenne du périodogramme. D'autre part, les relations linéaires entre capteurs mobiles et références sont estimés via le rapport entre interspectre et autospectre de référence, c'est l'estimateur H_1 . La convergence de cet estimateur est toujours plus rapide que celle des quantités interspectrales, pour la simple raison qu'il mesure une relation linéaire déterminée, quand les autospectres estiment la densité spectrale de signaux potentiellement aléatoires. Les interspectres entre références et voies mobiles peuvent donc être corrigées, à partir de l'estimateur H_1 et de l'autospectre de référence moyenné sur l'ensemble des passes de mesure :

$$S_{ir}^c = H_{ir}^k \langle S_{rr} \rangle = \frac{S_{ir}^k}{S_{rr}^k} \langle S_{rr} \rangle$$

où $\langle S_{rr} \rangle$ représente l'autospectre de la référence r moyenné sur l'ensemble des passes d'acquisition, l'indice k la passe de mesure k pendant laquelle est acquis le signal mobile i , et S_{ir}^c l'interspectre corrigé. Ce principe de correction des interspectres de capteurs mobiles est utilisé dans l'article [P6] pour étendre les méthodes ASC et ASP au cas des mesures réalisées en plusieurs passes. La méthode a été mise en œuvre avec succès notamment dans le cadre d'une étude d'imagerie acoustique moteur réalisée pour le compte de renault [R2]. Cette approche est particulièrement utile dans le cas où le nombre de passes est très important, lorsqu'on utilise un système à balayage spatial par exemple. La durée d'acquisition allouée à chaque passe est restreinte, pour conserver une durée totale d'acquisition acceptable. Le vecteur des spectres complexes référencés à la voie r est estimé via l'interspectre

corrigé :

$$\mathbf{x}_r = \frac{\mathbf{S}_{\mathbf{x}_r}^k}{S_{rr}^k} \sqrt{\langle S_{rr} \rangle} \quad (1.3)$$

On donne ici pour l'exemple la déformée opérationnelle d'une plaque mesurée l'aide d'un laser à balayage (figure 1.6, [R6]). La référence de phase est donnée par un accéléromètre placé sur la plaque. La déformée opérationnelle classique obtenue par l'équation (1.2) est présentée à gauche, et le résultat corrigé par l'autospectre de référence moyenné (Eq. (1.3)) est présenté à droite. Ce dernier est visiblement nettement moins bruité. Sur cet exemple, 5s sont consacrées au calcul du périodogramme à chaque point de mesure.

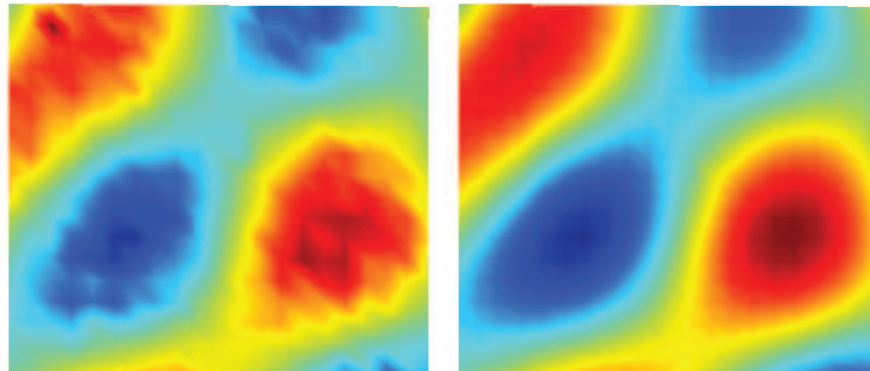


FIGURE 1.6 – Déformée opérationnelle de plaque, vitesse vibratoire estimée pour chaque point de mesure (à gauche), vitesse vibratoire recomposé avec l'autospectre de référence moyenné (à droite). tiré de [R6]

1.2 Application de la cyclo-stationnarité à la séparation de sources

Publications & communications : [P9, P11, C10, C13, C18, C19, C20, C21, C22, C32, CN7]

Collaboration(s) industrielle(s) : PSA [E5]

Encadrement(s) : [T1, T2]

Un signal est dit cyclo-stationnaire si ses propriétés statistiques sont périodiques. Cette propriété est moins restrictive que la périodicité ou la stationnarité : les signaux purement périodiques ou stationnaires, par exemple, sont des signaux qui satisfont la cyclo-stationnarité. Les signaux stationnaires ont par définition des propriétés statistiques constantes, et sont donc cyclostationnaires quelle que soit la période considérée. Les signaux purement périodiques ont une espérance périodique égale à une période du signal, et une variance périodique nulle. De nombreux signaux vibro-acoustiques ne sont ni périodiques, ni stationnaires, mais satisfont la cyclo-stationnarité. C'est souvent le cas des signaux issus de machines tournantes, dont le fonctionnement est régi par un cycle mécanique au bout duquel le mécanisme aura retrouvé exactement sa configuration initiale. D'abord appliquée au domaine des télécommunications dans les années 80, la théorie cyclostationnaire est désormais un outil largement appliqué pour l'étude des signaux issus de machines tournantes⁴.

Une application fondamentale de la cyclo-stationnarité est la séparation des composantes périodiques et aléatoires d'un signal. Cette séparation est réalisée en moyennant dans le domaine temporel (ou angulaire) les réalisations du signal sur un cycle. La moyenne obtenue, dite moyenne synchrone, est une estimation de la partie déterministe du signal (aussi appelée partie cyclostationnaire d'ordre 1). La moyenne synchrone est ensuite retranchée au signal à chaque cycle, pour obtenir la composante aléatoire. Cette opération constitue en elle-même une séparation de sources, dans le sens où les phénomènes conduisant à l'établissement d'un processus aléatoire ou déterministe (périodique) sont de natures différentes.

1.2.1 Filtrage de Wiener appliqué à l'extraction du bruit de combustion Diesel

Le filtrage de Wiener est un outil permettant d'extraire d'un signal bruité $s(t)$ la contribution d'un signal de référence $r(t)$, c'est donc une méthode de séparation de sources supervisée. Le filtre de Wiener correspond à l'estimation H_1 d'une fonction de transfert entre $r(t)$ et $s(t)$, qui permet de minimiser l'erreur d'estimation due au bruit présent sur $s(t)$. Cette approche apparaît particulièrement adaptée à la problématique d'extraction de bruit de combustion Diesel. Les signaux de référence pour ce type d'application sont les pressions cylindres, qui font l'objet d'une attention particulière pour les problématiques liées

4. J. Antoni. Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 :987–1036, 2009.

au bruit Diesel depuis plus de 50 ans. L'application du filtrage de Wiener aux signaux Diesel remonte au début des années 2000, on peut citer la thèse de Renard⁵ et les travaux de El Badaoui *et al.*⁶.

Le principe de base est d'extraire la contribution des signaux de combustion dans un signal réponse, issu typiquement d'un accéléromètre ou d'un microphone. Cela nécessite l'estimation d'autant de filtre de Wiener qu'il y a de cylindres. Une difficulté particulière apparaît cependant lors de cette approche, et réside dans la forte cohérence des signaux d'un moteur Diesel, que ce soit entre signaux de pressions cylindres ou entre bruit de combustion et bruit mécanique. Cela complique fortement l'estimation H_1 du filtre de Wiener, qui permet de s'affranchir du bruit uniquement si ce dernier est décorrélé du signal de référence. La méthode utilisée pour séparer les contributions des différentes combustions est un fenêtrage cyclique simple, qui conservera pour une combustion donnée la fenêtre temporelle correspondante du signal réponse. Cette étape n'est pas sans effet sur l'estimation du filtre, qui est estimé sur des fenêtrage temporelles qui peuvent être très courtes. Les bruits mécaniques tels que la distribution ou le basculement de piston ne peuvent pas être efficacement supprimés par fenêtrage, car ils apparaissent en partie au même moment que la combustion. Une illustration d'extraction de bruit de combustion est donnée en figure 1.7.

La thèse de Laurent Pruvost [T1] a porté sur l'étude du filtrage de Wiener pour séparer le

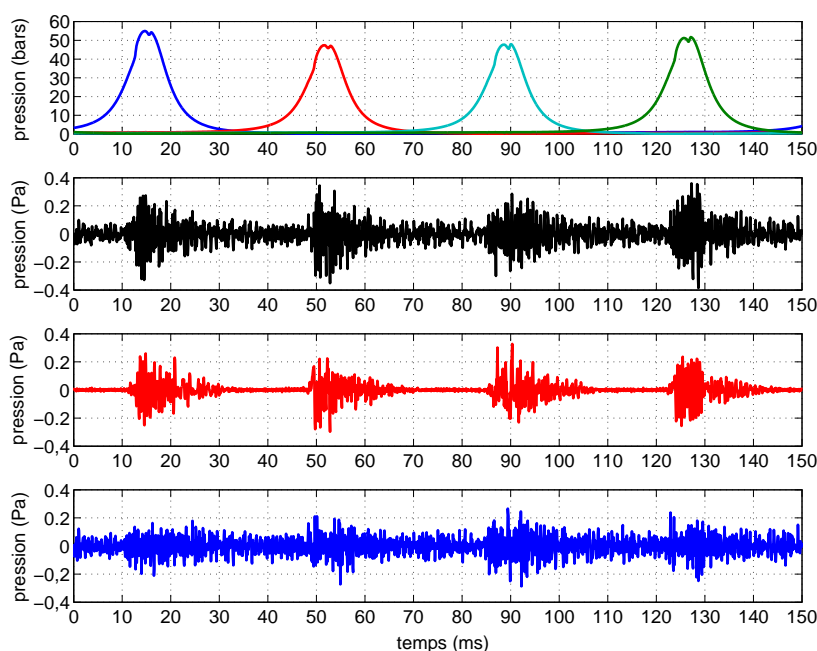


FIGURE 1.7 – Du haut vers le bas : signaux de pressions cylindres, signal microphone (noir), bruit de combustion extrait (rouge), bruit mécanique résiduel (bleu). Tiré de [T1]

bruit de combustion du bruit mécanique émis par un moteur Diesel. Il a fallu établir dans un

5. C. Renard. *Atténuation de structure et bruit de combustion : contribution à l'expertise NVH sur les moteurs Diesel*. PhD thesis, Université du Maine, 2005.

6. M. El Badaoui, J. Danière, F. Guillet, and C. Servière. Separation of combustion noise and piston-slap in diesel engine-part i : Separation of combustion noise and piston-slap in diesel engine by cyclic wiener filtering. *Mechanical System and Signal Processing*, 19 :1209–1217, 2005.

premier temps le domaine d'étude du filtre, en temporel ou en angulaire. L'échantillonnage angulaire est en effet largement utilisé dans les approches cyclostationnaires pour l'étude des machines tournantes. L'intérêt principal de l'étude dans le domaine angulaire est que chaque réalisation de cycle possède le même nombre d'échantillons, alors que ce nombre peut varier dans le domaine temporel en cas de variation (ou même de légères fluctuations) de la vitesse de rotation moyenne du cycle. L'approche temporelle a néanmoins été choisie, car si l'hypothèse d'invariance du système linéaire étudiée peut être faite en temps, elle n'est plus vraie en angle. La possibilité de travailler sur les parties aléatoires des signaux a été étudiée. La forte cohérence entre les bruits mécaniques et le bruit de combustion est en effet due principalement au caractère périodique des phénomènes étudiés. Cette cohérence se porte donc essentiellement sur les parties périodiques des signaux, il paraissait donc intéressant d'estimer le filtre de Wiener à partir des parties aléatoires résiduelles. L'inconvénient de cette approche est que ces parties résiduelles sont peu énergétiques, l'estimation basée sur les parties aléatoires des signaux est donc plus affectée par le bruit de mesure. Il convenait donc d'établir si l'approche basée sur les parties aléatoires était plus ou moins fiable que l'approche classique, ce qui a été fait dans un premier temps sur des signaux de synthèse [CN7, C13, C10]. La validation sur moteur en fonctionnement est plus ardue, car le bruit de combustion réel reste inconnu. Durant ses travaux de thèse, Laurent Pruvost a traité un grand nombre de points de fonctionnement moteur (régime, charge), ce qui a permis d'adopter une démarche statistique pour estimer la performance des différentes approches.

Deux critères indirects ont été définis, permettant d'estimer la justesse des filtres estimés : la causalité et la stabilité. Un filtre caractérisant une fonction de transfert excitation-réponse est causal par nature. Les filtres estimés doivent donc se révéler causaux. Les filtres représentent par ailleurs la réponse vibro-acoustique du bloc-moteur, qui est a priori peu sensible aux variations de conditions de fonctionnement. La stabilité des filtres obtenus pour différents points de fonctionnement a constitué le second critère indirect d'évaluation. Les deux indicateurs, obtenus pour 160 points de fonctionnement différents, sont présentés sur la figure 1.8 pour les filtres de Wiener estimés avec la totalité des signaux puis avec leurs parties aléatoires seulement.

Il apparaît clairement sur ces résultats que les filtres estimés à partir des parties aléatoires apparaissent plus fiables, car moins sensibles aux conditions de fonctionnement et possédant un caractère causal plus marqué. Ce résultat permet d'affirmer que l'erreur due à la corrélation entre excitations mécaniques et de combustion est plus néfaste que l'erreur due à la faible corrélation entre parties aléatoires de la combustion et du bruit moteur.

Les filtres obtenus conservent cependant une forte dépendance au point de fonctionnement étudié, comme l'illustre la figure 1.9, présentant un même filtre pour différents points de fonctionnement.

Un des objectifs de la thèse de Julie Drouet [T2] est de comprendre les raisons de cette variabilité et son impact sur les bruits de combustion synthétisés. Les filtres obtenus sur le moteur en fonctionnement ont été comparés à des fonctions de transfert mesurées sur moteur à l'arrêt par marteau d'impact. Un exemple est donné sur la figure 1.9, où la fonction de transfert mesurée entre un impact vertical culasse est une accélération verticale palier vilebrequin est comparée au spectrofiltre identifié entre la pression de combustion

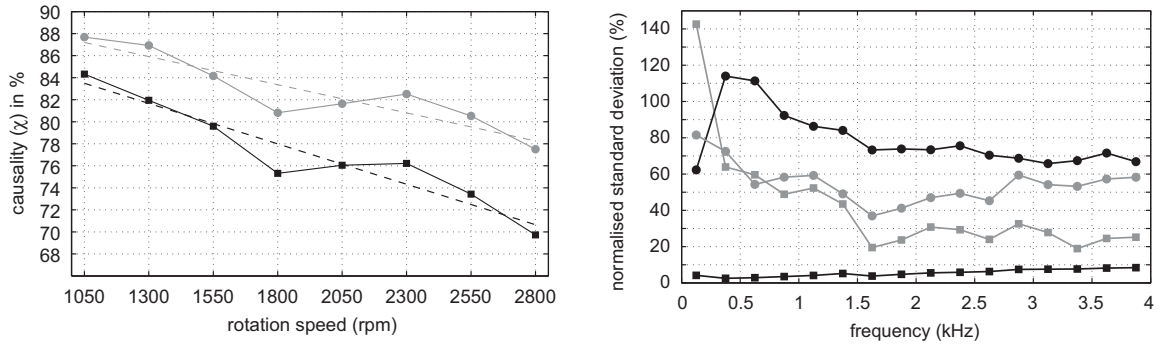


FIGURE 1.8 – A gauche : critère de causalité moyen des filtres estimés à partir des signaux bruts (en noir) et de leurs parties aléatoires (en gris). A droite : écarts types normalisés observés (ronds) et calculés à partir de la fonction de cohérence (carrés) pour les signaux bruts (en noir) et pour leurs parties aléatoires (en gris). Tiré de [P9]

-exprimée en Newton via la section du piston- et le même capteur d'accélération palier. Cette comparaison permet plus particulièrement d'identifier la forte contribution de la voie basse du bruit de combustion (passage par l'attelage mobile) entre 1 et 2 kHz, observée sur le spectrofiltre et absente de la fonction de transfert mesurée au marteau de choc. Des outils d'analyse modale (LSCE, ESPRIT) ont été appliqués pour comparer des indicateurs tels que la densité modale et le taux d'amortissement [T2]. Il apparaît que le taux d'amortissement identifié augmente avec le point de fonctionnement, et est dans tous les cas supérieur au taux mesuré moteur à l'arrêt (cf. figure 1.10). Cette observation est directement liée au problème de fenêtrage des signaux utilisé en fonctionnement : la taille des fenêtres temporelles utilisées est définie par la durée d'une fraction de cycle moteur, qui diminue lorsque la vitesse de rotation augmente. Si cette durée est plus courte que la durée de la réponse impulsionnelle du moteur, alors le fenêtrage a un effet de lissage en fréquence du spectrofiltre qui se traduit par une surestimation des taux d'amortissement identifiés par analyse modale.

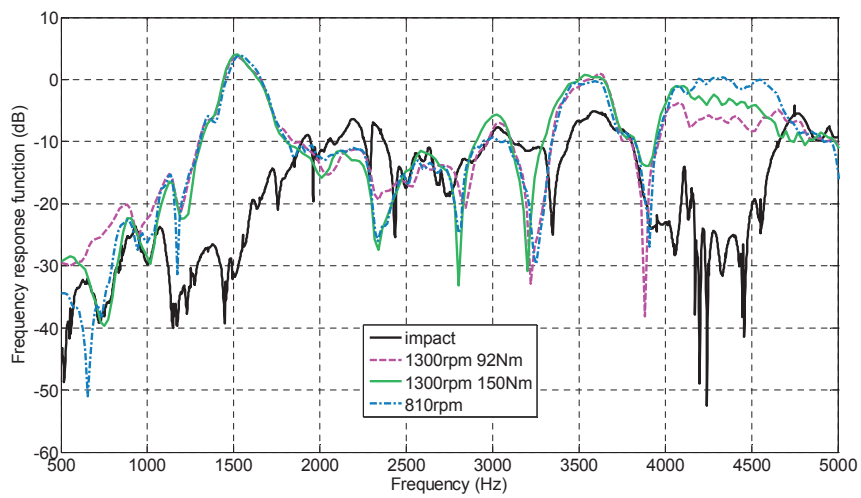


FIGURE 1.9 – En couleurs : spectrofiltres au palier vilebrequin (axe vertical) pour divers points de fonctionnement. En noir : fonction de transfert obtenue au marteau de choc entre le palier vilebrequin et la culasse. Tiré de [T2]

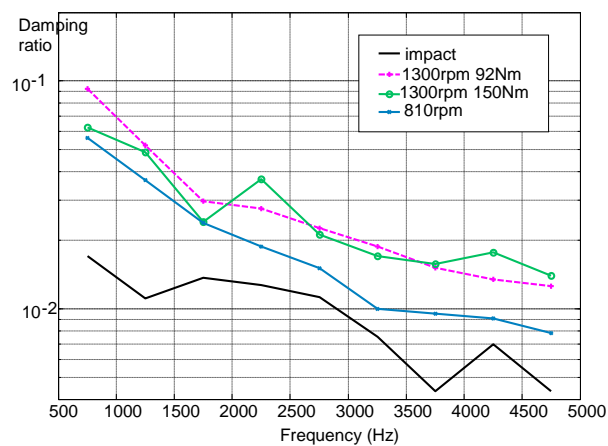


FIGURE 1.10 – Amortissement des composantes modales obtenues par méthode ESPRIT pour différents points de fonctionnement (couleurs) et moteur à l'arrêt (noir). Tiré de [C20]

1.2.2 contribution à l'étude des processus cyclo-stationnaires flous

La théorie cyclo-stationnaire trouve ses limites, pour l'analyse des machines tournantes, lorsque la vitesse de rotation fluctue de manière significative d'un cycle à l'autre (cf. concept de cyclo-stationnarité floue introduit par Bonnardot ⁷). Si les signaux sont échantillonnés en temps, alors les cycles ont des durées différentes, et les intervalles de temps séparant les événements fluctuent. Si les signaux sont échantillonnés en angle, alors c'est le filtrage de la structure (réponse impulsionnelle en temps) qui fluctue. Dans les deux cas, la moyenne synchrone est affectée, mais de manières différentes. Cet effet est étudié théoriquement et expérimentalement dans le cas d'un moteur Diesel, suite au travail de thèse de Laurent Pruvost [C19, P11]. Dans ce travail, il est montré que la moyenne synchrone du signal en temps peut être moins biaisée que la moyenne en angle, pour les événements mécaniques ayant lieu au voisinage de l'angle de synchronisation choisi. Une idée est alors de calculer cette moyenne synchrone en temps pour différents angles de synchronisation, ce qui permet d'obtenir une moyenne synchrone glissante sur toute la longueur du cycle (cf. [C22]). L'étude de l'enveloppe de cette moyenne glissante apporte des informations pouvant être utiles au diagnostic.

On donne en exemple sur la figure 1.11 (en haut) la valeur RMS de la moyenne synchrone

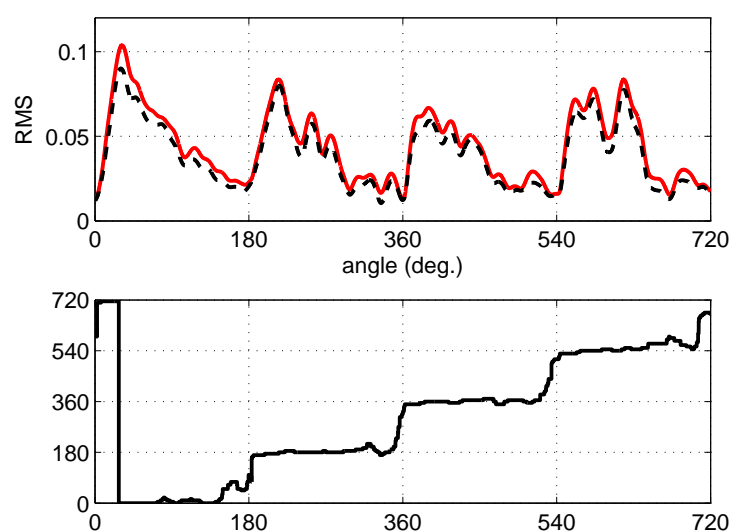


FIGURE 1.11 – En haut : valeur RMS de la moyenne synchrone d'un signal microphonique de bruit moteur 4 cylindres sur un cycle (tirets noir : en angle, rouge : en temps). en Bas : angle de synchronisation maximisant la moyenne synchrone en temps. Tiré de [C22]

d'un signal microphonique sur un cycle moteur Diesel, calculée en temps ou en angle. La valeur RMS du signal en temps est maximisée en fonction d'un angle de synchronisation, et l'angle de synchronisation maximisant cette valeur RMS est tracé sur la même figure

7. F. Bonnardot. *Comparaison entre les analyses angulaire et temporelle des signaux vibratoires de machines tournantes. Etude du concept de cyclostationnarité floue.* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2004.

(en bas). Ce type d'analyse nous permet d'identifier précisément l'occurrence angulaire d'événements contribuant majoritairement au signal étudié : on distingue clairement sur cet exemple les 4 valeurs d'angle de synchronisation correspondant aux 4 combustions.

Chapitre 2

Méthodes inverses pour l'identification de sources vibratoires

On distingue deux grandes familles de problèmes inverse en analyse vibratoire, l'identification des sources de vibrations et l'identification ou le recalage de modèles. Ces deux grandes classes de problèmes inverses ont pour donnée d'entrée la réponse du système, ainsi qu'un modèle plus ou moins élaboré de la structure étudiée pour la première ou d'une information sur l'excitation pour la seconde. Cette qualification de problème inverse est donnée par opposition au problème direct, qui consiste à simuler la réponse à l'aide d'un modèle du système et de l'excitation. Les problèmes inverses sont souvent des problèmes mal posés au sens de Hadamard car ils peuvent présenter une forte instabilité, se traduisant par de fortes perturbation des résultats induites par de faibles perturbations des données. Nous nous intéressons ici à la première classe de problèmes inverses concernant l'identification des sources vibratoires à partir d'une loi de comportement de la structure étudiée. Dans cette classe de problèmes inverses, nous aborderons deux situations, en fonction du niveau de connaissance a priori des points d'application des efforts. Les méthodes d'analyse de voies de transfert, qui font l'objet des deux premières sections de ce chapitre, requièrent la localisation a priori des zones de la structure soumise à excitation, seuls les valeurs d'excitation injectées seront identifiées à partir des mesures. La méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée), sujet de la troisième section, permet à la fois une localisation et une quantification des excitations.

2.1 Analyse des voies de transfert par mesure indirecte d'efforts

Publications & communications : [P1, P3, PN1, C1, C2, C3, C5, C9, C12, C16, CN1, CN2, CN3, M1, M2]

Collaboration(s) industrielle(s) : Renault [C5, P3], Volvo Trucks [R3, C9], Irisbus [PFE6, C16]

Encadrement(s) : [PFE1, PFE6, PFE3, PFE5]

2.1.1 contexte scientifique

La méthode d'identification d'efforts a priori localisés par méthode inverse a été introduite à la fin des années 1970¹. L'idée de cette méthode est de considérer la structure munie de capteurs de réponse vibratoire comme un capteur d'effort multidimensionnel². La sensibilité de ce capteur est matricielle, et s'obtient en inversant la matrice de transfert \mathbf{H} reliant efforts \mathbf{F} et réponses \mathbf{X} :

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}^+ \mathbf{X},$$

soit, en utilisant les matrices interspectrales,

$$\mathbf{S}_{\mathbf{F}\mathbf{F}} = \mathbf{H}^+ \mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} \mathbf{H}'.$$

Cette méthode de mesure indirecte d'efforts est la base de la méthode TPA (Transfer Path Analysis) développée dans les années 1990 et largement diffusée dans le domaine industriel. Cependant, son implémentation reste difficile dans des cas complexes pour plusieurs raisons :

- la méthode nécessite le découplage entre les sources d'excitation et la structure réceptrice (si la matrice de transfert est obtenue par la mesure),
- l'inversion de la matrice de transfert nécessite une étape de régularisation délicate à mettre en œuvre,
- la méthode reste de manière générale extrêmement sensible aux erreurs de modèle, lorsque la matrice de transfert utilisée ne correspond pas parfaitement aux transferts réels .

Ce dernier point pose problème à la fois lorsque la matrice de transfert utilisée est estimée par calcul analytique ou numérique, à cause de l'existence d'un biais de modèle, mais aussi lorsque les transferts sont mesurés, car le découplage source-structure, nécessaire, induit bien souvent un changement de comportement dynamique de la structure réceptrice.

Plusieurs améliorations ont été apportées à cette méthode, notamment au cours de ma thèse de doctorat [M2], dont l'objectif était de réaliser une mesure indirecte des ef-

1. F.D. Bartlett and W.G. Flannelly. Model verification of force determination for measuring vibratory loads. *Journal of the American Helicopter Society*, 24 :10–18, 1979.

2. K.S. Stevens. Force identification problems-an overview. In *Proceedings of SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, pages 838–844, Houston, TX, USA, 1987.

forts internes appliqués à un bloc moteur Diesel de véhicule léger en fonctionnement. Ces améliorations, détaillées dans les sous-sections suivantes, concernent

- la correction par pondération gauche des problèmes liés aux hétérogénéités de structure et aux incertitudes de mesure des fonctions de transfert [C1],
- l'utilisation de la méthode des moindres carrés totaux pour le problème de mesure indirecte d'efforts [M2, P1],
- la pondération droite permettant d'optimiser la régularisation en cas d'identification d'excitations de nature différentes [C5].

2.1.2 Correction par pondération gauche de la matrice de transfert

Le principe de cette correction repose sur l'observation de la quantité minimisée par l'approche moindres carrés, qui est la norme euclidienne de l'erreur de reconstruction :

$$J(\mathbf{F}) = \|\mathbf{X} - \mathbf{H}\mathbf{F}\|^2 = \sum_i (X_i - X_i^{post})^2$$

L'opération de sommation, inhérente au calcul de la norme, donne la même importance à l'erreur de reconstruction pour l'ensemble des points de mesure de réponse vibratoire lors de la minimisation de J . Or, une pondération peut s'avérer bénéfique, lorsque l'erreur de reconstruction n'a pas la même importance pour tous les points de mesure. C'est le cas si la structure présente de fortes hétérogénéités de comportement dynamique. Par exemple, le palier vilebrequin d'un moteur thermique est particulièrement raide et se déforme peu, ce qui fait qu'une erreur de reconstruction au palier sera considérée comme moins pénalisante qu'une erreur de reconstruction sur un endroit plus souple et donc à plus forte amplitude vibratoire. C'est aussi le cas lorsque des éléments de la matrice de transfert mesurée sont connus avec une forte incertitude (estimée par la fonction de cohérence associée). C'est également le cas lorsque les réponses vibratoires sont de natures différentes (accélération et pressions acoustiques par exemple). L'opération de pondération se traduit par une multiplication par la gauche de la matrice de transfert par une matrice diagonale \mathbf{G} constituée des pondérations allouées à chaque capteur de réponse.

$$\mathbf{F} = (\mathbf{G}\mathbf{H})^+ \mathbf{G}\mathbf{X} = \mathbf{H}^{+G} \mathbf{X}$$

où \mathbf{H}^{+G} désigne la pseudo-inverse pondérée à gauche de la matrice \mathbf{H} .

Différentes stratégies de pondération ont été décrites et implémentées dans les travaux [PN1],[CN2], [P1].

2.1.3 Méthode des moindres carrés totaux appliquée à la mesure indirecte d'efforts

Le principe des moindres carrés classique (LS), appliqué au problème d'identification de sources, est de reconstruire au mieux le(s) champ(s) de réponses mesuré(s) (colonnes de \mathbf{X}) par une composition linéaire des champs de réponses générés par chaque effort potentiel (colonnes de \mathbf{H}). Le principe des moindres carrés totaux (TLS) est de reconstruire au

mieux les réponses mesurées *et* les réponses générées par chaque effort potentiel sur une base commune, construite à partir de la décomposition en valeurs singulières de la matrice $[\mathbf{H}, \mathbf{X}]$, que l'on sait théoriquement dégénérée. La différence entre LS et TLS est donc que la matrice de transfert donnée a priori peut être différente de la matrice de transfert a posteriori.

$$[\mathbf{H}, \mathbf{X}] = \mathbf{U}\mathbf{S} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\mathbf{H}} \\ \mathbf{V}_{\mathbf{X}} \end{bmatrix}'$$

Les valeurs a posteriori de la matrice de transfert et des réponses sont obtenues en conservant les n plus grandes valeurs singulières

$$\mathbf{H}^{post} = \mathbf{U}_n \mathbf{S}_n \mathbf{V}_{\mathbf{H}n}'$$

$$\mathbf{X}^{post} = \mathbf{U}_n \mathbf{S}_n \mathbf{V}_{\mathbf{X}n}'$$

où \mathbf{U}_n \mathbf{V}_n sont constituées des colonnes de \mathbf{U} et \mathbf{V} correspondant aux n plus grandes valeurs singulières, elles mêmes rassemblées sur la matrice diagonale \mathbf{S}_n . L'effort identifié au sens des moindres carrés totaux vaut finalement

$$\mathbf{F}^{TLS} = (\mathbf{V}_{\mathbf{H}n}')^{-1} \mathbf{V}_{\mathbf{X}n}'$$

Cette approche moindres carrés totaux, quoique séduisante sur le papier, s'avère beaucoup plus sensible que l'approche moindres carrés classique, cf. [M2, P1]. Elle peut cependant être utilisée pour s'assurer de la validité de la solution, lorsque les deux approches LS et TLS donnent des résultats identiques.

2.1.4 Correction par pondération droite de la matrice de transfert

Si la pondération par la gauche de la matrice de transferts revient à jouer sur l'amplitude des réponses vibratoires, la pondération par la droite modifie l'amplitude des efforts recherchés. Ce type de pondération n'a pas d'incidence sur le résultat tant qu'aucune régularisation n'est appliquée. L'introduction d'un paramètre de régularisation (du type Tikhonov) dans l'approche des moindres carrés revient à ajouter un terme d'efforts dans le problème de minimisation :

$$J(\mathbf{F}, \beta) = \|\mathbf{X} - \mathbf{H}\mathbf{F}\|^2 + \beta \|\mathbf{F}\|^2$$

Dans ce cas, on cherche à minimiser à la fois la norme de l'erreur de reconstruction des réponses, mais également la norme des efforts identifiés. Les poids relatifs des efforts les uns par rapport aux autres vont donc avoir une incidence sur la minimisation de J . Pour ajuster les poids des efforts, on utilise une pondération à droite de la matrice de transfert :

$$\mathbf{F} = (\mathbf{H}\mathbf{D})^{+\beta} \mathbf{D}\mathbf{X} = \mathbf{H}^{+\beta\mathbf{D}} \mathbf{X}$$

où $\mathbf{A}^{+\beta}$ représente l'inverse régularisée de \mathbf{A} :

$$(\mathbf{A})^{+\beta} = (\mathbf{A}'\mathbf{A} + \beta\mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}'$$

La pondération par la droite peut s'avérer nécessaire lorsque les efforts identifiés sont de natures différentes. Pour le cas de l'application moteur, les efforts recherchés sont des forces et des moments au niveau des paliers vilebrequin. La norme euclidienne simple $\|\mathbf{F}\|$ n'a dans ce cas de sens physique, car les unités des éléments de \mathbf{F} sont différentes.

Deux pondérations par la droite ont été envisagées pour s'affranchir de ce problème. La première, utilisée dans [P3], consiste à convertir les moments de palier en Newton, en les pondérant par un bras de levier égal à la largeur des paliers considérés. La seconde, appliquée dans [C5], consiste à ajuster la pondération droite pour rendre égales les normes des colonnes de \mathbf{H} . Cette dernière approche nécessite l'implémentation d'un processus itératif si une pondération par la gauche visant à égaliser les normes des lignes de \mathbf{H} est également réalisée. La solution est alors la suivante :

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= \mathbf{H}^{+\beta\mathbf{G}\mathbf{D}}\mathbf{X} \\ &= \mathbf{D}(\mathbf{G}\mathbf{H}\mathbf{D})^{+\beta}\mathbf{G}\mathbf{X} \\ &= \mathbf{D}(\mathbf{D}\mathbf{H}'\mathbf{G}^2\mathbf{H}\mathbf{D} + \beta\mathbf{I})^{-1}\mathbf{D}\mathbf{H}'\mathbf{G}^2\mathbf{X}\end{aligned}$$

où \mathbf{G} et \mathbf{D} sont les matrices diagonales de pondération, et β le paramètre de régularisation de Tikhonov.

2.1.5 Applications industrielles

La méthode d'identification d'efforts, agrémentée des différentes améliorations proposées, a été développée pendant le travail de thèse [M2] financé par Renault, et appliquée à un moteur Diesel de véhicule léger monté pour l'occasion sur banc à l'INSA, cf. [P1, P3]. La méthode a été transposée à un moteur de poids lourd à l'occasion d'un contrat post-doctoral réalisé pour le compte de Volvo Powertrain [R3, PFE5]. Au cours de cette étude, les mesures ont été réalisées sur un moteur 6 cylindres de 11 litres, nécessitant un grand nombre de voies d'acquisition (96 au total, mesures réalisées sur les bancs moteurs Renault Trucks). Un résultat typique de hiérarchisation de sources est donné en figure 2.1 (à droite), pour un cas de fonctionnement pleine charge à 1900 tours/min. Il apparaît clairement sur ces résultats la prédominance pour le bruit de combustion de la voie basse (paliers vilebrequin) sur la voie haute (culasse) dès 600Hz, et la prédominance du bruit de pignonnerie entre 1 et 2 kHz. Une autre application a été réalisée de ce cadre du projet de fin d'études de Nicolas Hory et Samuel André pour le compte d'Irisbus [PFE6]. L'objectif était ici de hiérarchiser les voies de passage du bruit moteur généré à l'intérieur d'un autocar. Des mesures de fonction de transfert sans moteur ont notamment été réalisées sur le châssis de l'autocar, suivies d'une campagne de mesures en roulage sur le circuit de la Valbonne. Cette étude a fait l'objet d'une publication en congrès conjointe LVA/Irisbus [C16]. Un résultat est donné sur la figure 2.1 (à droite), donnant parmi le spectre de bruit dans le car les contributions du moteur (voies solidienne et aérienne), de la voie solidienne uniquement, puis des supports moteurs arrières uniquement.

Un contrat a été initié en 2010 avec PSA, impliquant le montage d'un Groupe Moto-Propulseur au banc à l'INSA. L'objectif est d'étudier les excitations internes en fonctionnement.

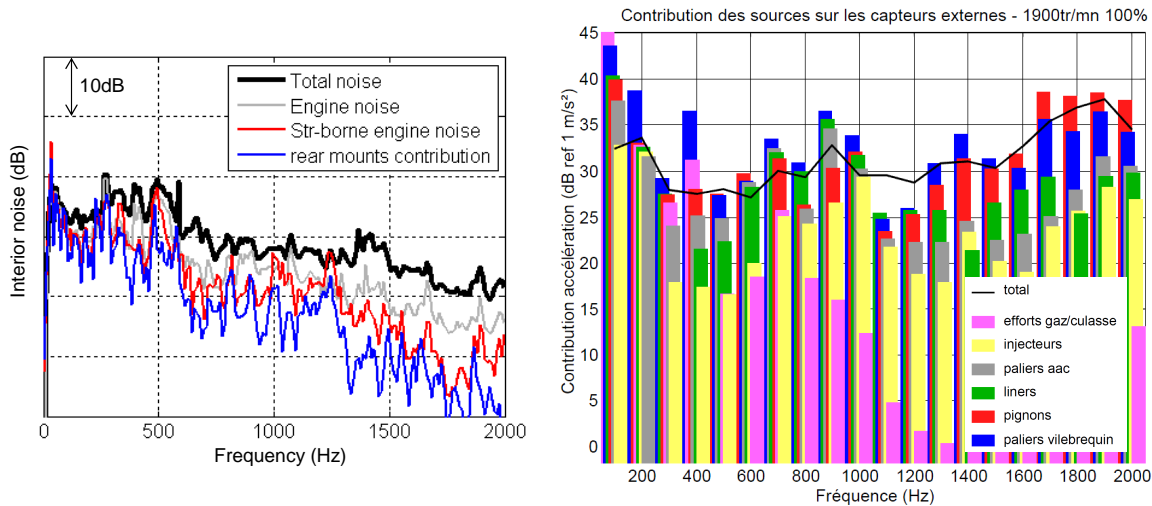


FIGURE 2.1 – A gauche : hiérarchisation des voies de passages dans un autocar en roulage, tiré de [C16]. A droite : hiérarchisation de sources sur moteur 6 cylindres 11L en fonctionnement au banc d’essais (1900tr/mn, pleine charge), tiré de [R3].

2.2 Analyse opérationnelle des voies de transfert

Publications & communications : [C28, C25, C27, C30, C29]

Collaboration(s) industrielle(s) : Vibratex [E1]

Partenaire(s) académique(s) : Université de Delft, Pays-Bas

La méthode d’analyse opérationnelle des voies de transfert (OPA pour Operational transfer Path Analysis) est une alternative à la méthode TPA présentée précédemment. L’objectif ici est de faire sans la mesure préalable des fonctions de transfert entre excitations et réponses, qui nécessite le découplage source-structure, et une campagne d’essais fastidieuse. L’idée est d’utiliser, à la place d’efforts identifiés par problème inverse, des mesures de réponse de la structure (appelées *indicateurs* et notées \mathbf{Y}) positionnées au voisinage des voies de transfert. L’objectif est de séparer sur un ensemble de voies de réponse (appelées *cibles* et notées \mathbf{X}) la contribution de chaque indicateur. Le système matriciel de transfert est remplacé par un système de transmissibilités :

$$\mathbf{X} = \mathbf{T}\mathbf{Y}$$

où \mathbf{T} est la matrice de transmissibilités. La participation de chaque indicateur aux réponses cibles est directement exprimée sur ce système. L’existence et l’unicité de la matrice \mathbf{T} nécessite la définition d’un ensemble d’efforts \mathbf{F} représentant les voies de passage entre la source et la structure :

$$\mathbf{X} = \mathbf{H}\mathbf{F} \quad \mathbf{Y} = \mathbf{\Phi}\mathbf{F} \quad \mathbf{T} = \mathbf{H}\mathbf{\Phi}^{-1}$$

où \mathbf{H} et $\mathbf{\Phi}$ sont des matrices de transfert entre d’une part les efforts, et d’autre part les cibles et les indicateurs, respectivement. On montre donc que l’existence et l’unicité de \mathbf{T} nécessite l’inversibilité de la matrice $\mathbf{\Phi}$.

L’inconvénient majeur de la méthode est que la participation d’un indicateur donné aux

cibles n'est pas forcément représentative de la contribution réelle de la voie de passage associée. En fait, on montre que c'est le cas seulement si la matrice Φ est strictement diagonale. Ce n'est bien sur jamais le cas, mais il a été montré dans le cadre d'une validation académique [C27] que les résultats étaient satisfaisant si les éléments de la diagonale de Φ sont en moyenne supérieurs à 10 fois les termes extra-diagonaux.

La méthode OPA nécessite l'identification indirecte de la matrice de transmissibilité. La matrice de transmissibilité peut être estimée à partir des matrices interspectrales obtenues à partir de la combinaison de différentes conditions de fonctionnement :

$$\begin{aligned} H_1[\mathbf{T}] &= \mathbf{G}_{xy} \mathbf{G}_{yy}^{-1} \\ H_2[\mathbf{T}] &= \mathbf{G}_{xx} \mathbf{G}_{yx}^+ = \mathbf{G}_{xx} \mathbf{G}_{yx} (\mathbf{G}_{yx} \mathbf{G}_{xy})^{-1} \end{aligned}$$

où $\mathbf{G}_{yy}, \mathbf{G}_{xy}$, et \mathbf{G}_{xx} représentent les matrices interspectrales des indicateurs et cibles. Ces deux estimations de la matrice \mathbf{T} sont correspondent aux estimateurs H_1 et H_2 des systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output). On note que dans les deux cas, il y a nécessité d'inverser les matrices interspectrales. Les matrices interspectrales obtenues pour un point de fonctionnement donné du système étudié sont souvent déficientes à cause de la corrélation entre sources. Il est donc nécessaire de les construire à partir de plusieurs points de fonctionnement, ou de mesures additionnelles. Cet aspect, étudié sur plusieurs cas expérimentaux, a fait l'objet d'études menées en collaboration avec l'université de Delft (Pays-Bas) [C25, C30].

Les estimateurs H_1 et H_2 doivent être utilisés en cas de bruit de mesure plus fort sur la sortie ou l'entrée, respectivement. Dans le cas d'un système de transmissibilité, le bruit de mesure est a priori équivalent sur les indicateurs et les cibles. La possibilité d'utiliser un estimateur matriciel H_s a été étudiée, et il a été montré à partir d'études numériques et expérimentales [C28] qu'il donnait de meilleurs résultats que H_1 ou H_2 . La performance de H_s dépend néanmoins du choix de paramètres de pondération, qui sont indispensables si des capteurs de nature différentes sont utilisés sur les indicateurs ou les cibles (typiquement accéléromètres et microphones).

2.3 Localisation et quantification de sources vibratoires par la méthode RIFF

Publications & communications : [P14, C17, CN8, P8]

Collaboration(s) industrielle(s) : PSA [R6]

Partenaire(s) académique(s) : Centre Acoustique du LMFA (Ecole Centrale Lyon) [R7], LAUM (Univ. du Maine)

La méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée, FAT-Force Analysis Technique en anglais) a été développée au laboratoire Vibrations Acoustique de l'INSA de Lyon dans les années 90, dans le cadre de la thèse de C. Pézerat³. Le principe de la méthode est d'identifier le champ d'excitation de structures à partir d'une formulation locale de son comportement dynamique. Développée dans le cadre des poutres en traction ou flexion pure, la méthode a été étendue aux structures 2D, les plaques en flexion pure puis des coques cylindrique. Dans tous les cas, l'équation de base de la méthode peut s'écrire

$$K \Gamma[y(\mathbf{x}, t)] + M \frac{\partial^2 y(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = p(\mathbf{x}, t)$$

où \mathbf{x} représente les dimensions géométriques du problème, t le temps, y le champ de déplacement de la structure, p le champ d'excitation, Γ l'opérateur spatial caractérisant le type de structure, et K et M des constantes représentatives de la raideur et la masse de la structure. On peut donc écrire, à la pulsation ω ,

$$K \Gamma[Y(\mathbf{x})] - M\omega^2 Y(\mathbf{x}) = P(\mathbf{x})$$

L'opérateur Γ fait intervenir des dérivées partielles spatiales, qui sont approchées par des schémas aux différences finies. Par exemple, dans le cas des poutres en flexion pure,

$$\Gamma[Y(x)] = \frac{\partial^4 Y(x)}{\partial x^4} \approx \Gamma_{\Delta}[Y(x)]$$

$$\text{avec } \Gamma_{\Delta}[Y(x)] = \frac{1}{\Delta^4} (Y_{(x-2\Delta)} - 4Y_{(x-\Delta)} + 6Y_{(x)} - 4Y_{(x+\Delta)} + Y_{(x+2\Delta)})$$

où Δ correspond au pas de maillage. Ainsi, pour l'exemple des poutres en flexion pure, l'estimation de la charge au point x , $P(x)$, se fait à partir de 5 points de mesure de $Y(x)$ de $x - 2\Delta$ à $x + 2\Delta$.

Le champ de pression ainsi obtenu est dans certain cas fortement bruité à cause de l'opérateur Γ qui peut fortement amplifier les erreurs de mesure situées dans les hauts nombres d'ondes. Il est alors possible de filtrer le champ de pression pour obtenir un résultat interprétable.

3. C. Pezerat. *Méthode d'identification des efforts appliqués sur une structure vibrante, par résolution et régularisation du problème inverse*. PhD thesis, INSA de Lyon, France, 1996.

2.3.1 Utilisation de capteurs de vitesse acoustique pour la méthode RIFF

L'identification d'un champ d'excitation sollicitant une structure par méthode RIFF nécessite un maillage de mesure relativement riche. L'acquisition des données a été facilitée par l'avènement de moyen de mesures sans contact tels que le laser à balayage, permettant d'obtenir rapidement le champ vibratoire d'une structure avec une résolution spatiale suffisante. Une limitation de ce type de moyen d'essai est que les différents points du maillage de mesure ne sont pas acquis de manière simultanée, au moins un capteur fixe doit être utilisé en tant que référence de phase, de manière à obtenir l'amplitude complexe du champ vibratoire. Cela peut s'avérer problématique lorsque le champ d'excitation n'est pas cohérent, de type champ diffus ou couche limite turbulente, par exemple.

Une alternative à la vibrométrie laser pour la mesure sans contact est la sonde de vitesse acoustique, développée et commercialisée depuis une dizaine d'années par microflown⁴. La mesure de la vitesse acoustique en paroi d'une structure vibrante est en effet égale par continuité à la vitesse vibratoire. Si la mesure de vitesse est légèrement déportée, il est toujours possible de remonter à la vitesse vibratoire par holographie acoustique. Cette possibilité a été étudiée et validée expérimentalement dans le cadre d'un contrat avec PSA [R6], qui a donné lieu à une publication [P8].

L'intérêt de l'alternative de mesure de vitesse acoustique est qu'une antenne de capteurs de vitesse ayant la forme du schéma aux différences finies permet l'acquisition simultanée nécessaire à l'identification de l'excitation au centre de l'antenne. Une telle antenne a été développée et utilisée dans le cadre d'une expérience de validation (cf. [C17]). Une plaque a été soumise à une excitation acoustique de type champ diffus. L'antenne utilisée, positionnée coté champ anéchoïque, est présentée sur la figure 2.2 (gauche). La pression identifiée par méthode RIFF est confrontée à la pression mesurée au microphone du coté champ diffus de la plaque sur la même figure 2.2 (droite).

La méthode basée sur l'utilisation d'une antenne de capteurs de vitesse acoustique a été utilisée dans le cadre du projet IP² [R7] de l'institut carnot I@L, résultant d'un partenariat entre le LVA de l'INSA de Lyon et le Centre Acoustique du LMFA à l'ECL. Un des objectifs de ce projet était d'identifier par méthode RIFF une excitation du type couche limite turbulente. Dans le cadre de cette étude, il a été montré expérimentalement et théoriquement l'aptitude de la méthode RIFF à identifier la part acoustique du champ d'excitation ([CN8]).

2.3.2 Correction des schémas aux différences finies pour la méthode RIFF

L'étude de la réponse du schéma RIFF dans le domaine des nombres d'ondes, étudiée à l'occasion du projet IP², a conduit à une réflexion sur la possibilité de corriger ce schéma de manière à affiner la méthode et élargir son domaine de validité en fréquence. En effet,

4. H-E De Bree, P Leussink, T Korthorst, H Jansen, T Lammerink, and M Elwenspoek. The microflown ; a novel device measuring acoustical flows. *Sensors and Actuators : A, Physical*, SNA054/1-3 :552-557, 1996.

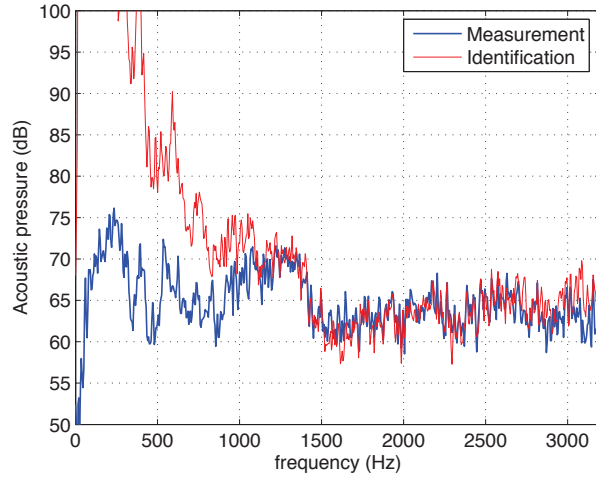
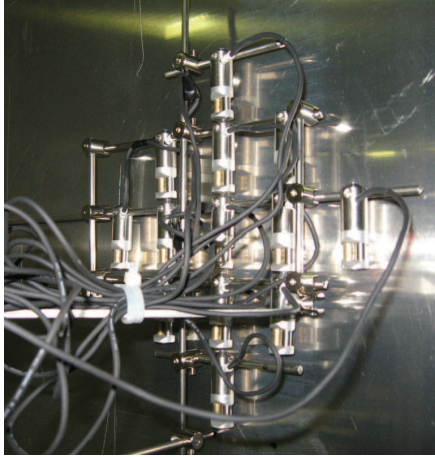


FIGURE 2.2 – Application de la méthode RIFF avec antenne de sondes microflows. Photographie de l’antenne (A gauche), Comparaison entre identification et mesure microphonique (à droite). Tiré de [P14]

l’approximation de l’opérateur de structure par différences finies se traduit par une réponse qu’il est possible de caractériser dans l’espace des nombres d’ondes. Cette réponse est tracée sur la figure 2.3 (gauche), pour le cas d’une poutre en flexion pure. On peut voir que cette réponse a l’allure d’un filtre passe-bas, avec un nombre d’onde de coupure égal au nombre d’onde naturel de flexion de la plaque. On note également une singularité au voisinage du nombre d’onde de coupure, qui peut conduire à une sévère surestimation du champ de pression.

Cette singularité peut être corrigée au niveau schéma RIFF, ce qui a été proposé pour les poutres et plaques en flexion pure dans [P14]. On donne ici pour l’exemple la correction obtenue pour les poutres, en fonction des paramètres physiques E , I , ρ , S (module d’Young, Inertie de flexion, masse volumique et section) :

$$\Gamma_{\Delta}^c[Y(x)] = \left(\frac{\Delta k_N^2}{2(1 - \cos(k_N \Delta))} \right)^2 \Gamma_{\Delta}[Y(x)], \quad \text{avec } k_N = \sqrt[4]{\frac{\rho S}{EI}} \omega$$

La réponse du schéma RIFF corrigé est tracé sur la même figure 2.3 (droite), la singularité est efficacement lissée et la réponse conserve une propriété de filtre passe bas. C’est d’ailleurs cette propriété qui permet d’utiliser la méthode RIFF sur des excitations comprenant de l’énergie dans les hauts nombres d’ondes, au delà de la limite de Shannon imposée par le pas du maillage utilisé. La réponse de la méthode RIFF corrigée apporte dans ce cas un filtrage anti-repliement indispensable pour la pertinence des résultats obtenus.

On constate sur des simulations un bénéfice significatif apporté par la correction proposée (cf. [P14]). Les DSP d’un effort constant en fréquence identifié par les méthodes RIFF classique et corrigée sont tracées sur la figure 2.3 (en bas). L’effort identifié par la méthode corrigée est relativement constant tandis que l’erreur de biais induite par l’approche classique varie sur cet exemple entre -5 et 5 dB.

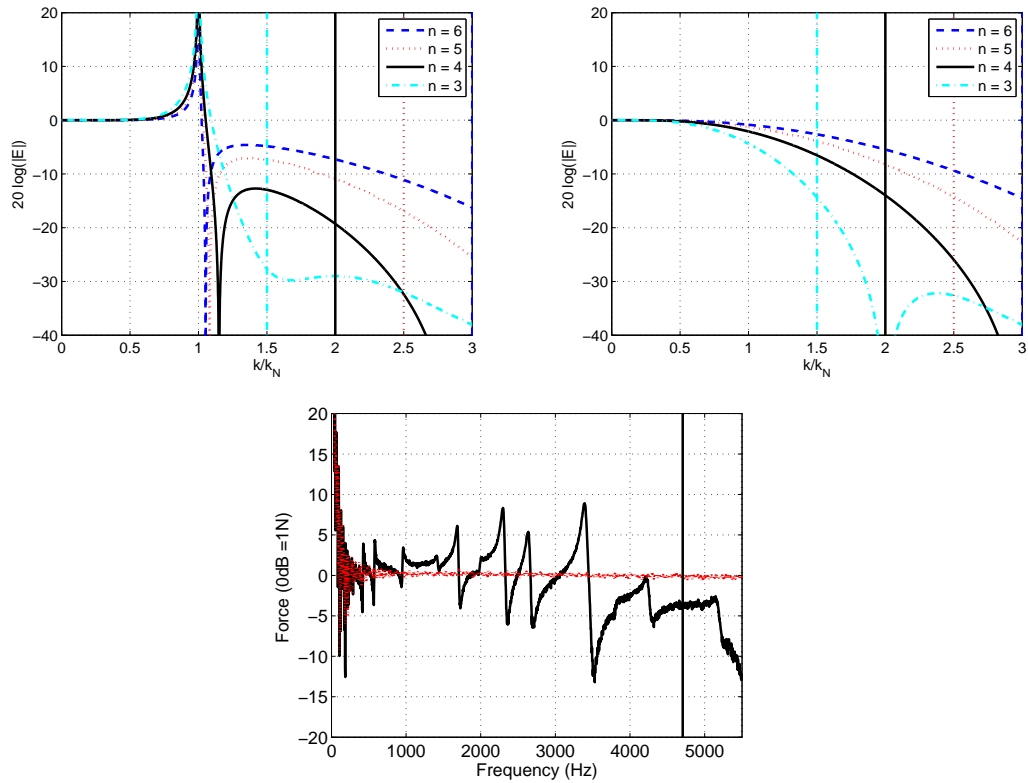


FIGURE 2.3 – Réponse du schéma RIFF classique (en haut à gauche) et corrigé (en haut à droite) dans le domaine des nombres d’ondes pour plusieurs valeurs de n (rapport entre longueur d’onde de flexion $2\pi/k_N$ et pas du schéma Δ). En bas : résultats de simulation d’identification d’un effort constant en fréquence (1N) par la méthode RIFF classique (en noir) et corrigée (en rouge). Les barres verticales représentent les limites du critère de Shannon par rapport à la longueur d’onde vibratoire (à gauche de la barre, on a $\Delta < \lambda_N/2$)

Chapitre 3

Caractérisation expérimentale du champ acoustique pour l'identification de sources sonores

L'étude d'une source sonore passe par la caractérisation de son champ acoustique rayonné. Cette caractérisation implique l'utilisation de moyens d'essais spécifiques, du type antennes de microphones ou systèmes robotisés, permettant la caractérisation du champ sur un grand nombre de points. Des méthodes de traitement, du type rétropropagation ou identification de sources, permettent d'utiliser cette grande quantité d'information pour localiser et quantifier les zones responsables du bruit rayonné.

Ce chapitre se divise en trois parties. La première partie concerne l'utilisation d'un vibromètre laser à balayage pour caractériser le champ acoustique. Ce moyen d'essai est classiquement utilisé pour des mesures vibratoires, on montrera ici qu'il peut être utilisé à des fins acoustiques. La seconde partie présente les contributions apportées aux techniques d'holographie acoustique basées sur la transformée de Fourier discrète du champ de pression ou (et) de vitesse. La troisième partie est dédiée à l'identification de sources par la méthode des sources équivalentes.

3.1 Mesure du champ acoustique par vibrométrie laser

Publications & communications : [P4, C11]

Encadrement(s) : [PFE4, DEA3, DEA6]

La mesure de vitesse vibratoire par vibrométrie laser est basée sur l'interférométrie lumineuse : un laser est envoyé en direction d'un objet vibrant. La longueur d'onde optique du faisceau rétro-diffusé est modifiée par la vitesse vibratoire de l'objet (par effet Doppler), et un interféromètre comparant faisceaux émis et rétro-diffusé permet d'obtenir le décalage Doppler et d'en déduire la vitesse vibratoire.

Nous présentons ici deux approches permettant d'utiliser ce moyen d'essai à des fins acoustiques. La première repose sur la mesure de vitesse vibratoire d'une membrane légère suspendue dans le champ acoustique étudié, et la seconde repose sur la technique de réfractovibrométrie, basée sur la mesure des fluctuations de la vitesse de la lumière induites par la pression acoustique.

3.1.1 Utilisation d'une membrane ultra légère pour mesurer le champ de vitesse acoustique

Cette approche est basée sur l'utilisation d'une membrane ultra-légère suspendue sans tension dans le champ acoustique étudié. En supposant cette insertion non intrusive, la mesure de la vitesse vibratoire de la membrane par vibrométrie laser donne accès à la composante de la vitesse acoustique normale au plan dans lequel est suspendue la membrane. L'objectif est donc de trouver une membrane qui soit optiquement diffusante, pour permettre une rétro-diffusion optimale du laser, et acoustiquement transparente, pour conserver la non-intrusivité.

La méthode a été développée et optimisée dans le cadre de plusieurs stages [PFE4, DEA3], et a donné lieu à une publication [P4] sur le principe de mesure et sur la correction de l'effet de masse de membrane dans le cas d'une onde plane. Une illustration expérimentale est donnée sur la figure 3.1, qui présente le champ de vitesse acoustique dans un plan au voisinage d'une enceinte acoustique. Cet exemple illustre la résolution extrêmement fine permise par l'utilisation du laser à balayage, obtenue sur une plage de fréquence très étendue (16Hz - 10kHz).

3.1.2 Mesure du champ de pression acoustique par réfractovibrométrie

La réfractovibrométrie, proposée par Zipster *et al.*¹, repose sur les effets de la pression acoustique sur la célérité des ondes électromagnétiques. La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans un gaz est donnée par la relation suivante :

$$v = c/n$$

1. L. Zipster and H.H. Franke. Refracto-vibrometry - a novel method for visualizing sound waves in transparent media. In *proceedings of acoustics'08*, Paris, France, 2008.

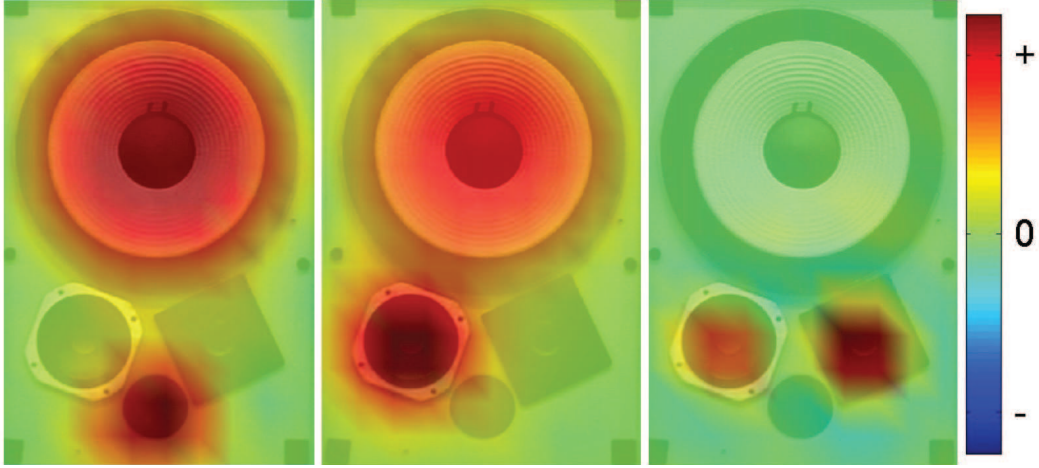


FIGURE 3.1 – Vitesse acoustique normale à proximité d’une enceinte acoustique, mesurée par vibrométrie laser sur membrane ultra-légère. A gauche : 60Hz (mode bass-reflex). Au centre : 500Hz, à droite : 9kHz.

où c est la vitesse de la lumière dans le vide et n l’indice de réfraction du milieu. La relation entre indice de réfraction et masse volumique d’un gaz est donnée par la loi de Gladstone :

$$n = 1 + \alpha\rho$$

où ρ est la masse volumique du gaz et α une constante. Cette loi est empirique, et traduit l’idée que plus la densité d’un gaz diminue, plus la célérité des ondes augmente pour se rapprocher de la célérité dans le vide.

En décomposant la masse volumique en la somme d’une constante ρ_0 et une variation acoustique ρ_a , on a

$$n = 1 + \alpha\rho_0 + \alpha\rho_a = n_0 + n_a$$

où n_0 est l’indice de réfraction du milieu au repos et n_a la variation acoustique de la réfraction. On a la relation suivante entre n_a et la pression acoustique p_a :

$$n_a = \alpha\rho_a = \frac{\alpha}{c^2}p_a = \kappa p_a$$

Dans l’air, pour le spectre visible, la constante κ est voisine de $2,8e^{-9}Pa^{-1}$. L’effet de la variation acoustique de l’indice de réfraction induit une modification de la vitesse de l’onde :

$$v = \frac{c}{n} \approx \frac{c}{n_0} \left(1 - \frac{n_a}{n_0}\right) \approx v_0 - c\frac{n_a}{n_0^2} \approx v_0 - c\kappa p_a$$

Pour donner un ordre de grandeur de la relation entre vitesse des ondes électromagnétiques et pression acoustique, on retiendra la relation suivante :

Une augmentation (resp. diminution) de pression de 1Pa entraîne une diminution (resp. augmentation) de la vitesse de la lumière de l’ordre de 1m/s

On considère maintenant un faisceau laser de longueur d'onde λ_i traversant un milieu acoustique uniforme de longueur L et se réfléchissant sur une cible strictement fixe. La variation temporelle de la pression acoustique induit un effet de glissement la longueur d'onde : si la pression acoustique augmente (resp. diminue), l'indice de réfraction augmente (resp. diminue) et génère une dilatation (resp. contraction) de la longueur d'onde. Le début d'un train d'onde voit un indice moyen plus faible (resp. plus élevé) que la fin d'un train d'onde : Une période d'onde de longueur λ_i traverse le milieu acoustique de longueur $2L$ (aller et retour) en un temps $T_1 = 2Ln_1/c$ pour le début du train d'onde, et $T_2 = 2Ln_2/c$ pour la fin du train d'onde, où n_1 et n_2 représentent la valeur moyenne de l'indice dans la cavité pendant les passages respectifs du début et de la fin de la période. La fin du train d'onde aura par conséquent contracté un retard égal à $T_2 - T_1$ sur le début. Ce retard implique une dilatation de la longueur d'onde égal à approximativement $c(T_2 - T_1)$. La longueur d'onde transmise vaut donc :

$$\lambda_t \approx \lambda_i + 2L(n_2 - n_1)$$

$\Delta n = (n_2 - n_1)$ représente une variation d'indice pendant la durée $\Delta t = 1/\nu \approx \lambda_i/c$ (durée de passage d'une période). on a donc

$$\lambda_t \approx \lambda_i \left(1 + \frac{2L}{c} \frac{\Delta n}{\Delta t} \right) = \lambda_i \left(1 + \frac{2L}{c} j\omega \kappa P_a \right)$$

pour une pression acoustique de pulsation ω telle que $p_a(t) = P_a e^{j\omega t}$.

Classiquement, la vibrométrie laser utilise l'effet Doppler, glissement de la longueur d'onde due à la vitesse V de la cible :

$$\lambda_r = \lambda_i \left(1 - \frac{2V}{c} \right)$$

Par identification, on obtient la valeur de la pression acoustique en fonction de la vitesse perçue par le laser :

$$P_a = \frac{jV}{L\omega\kappa} \quad (3.1)$$

Le principe de mesure par réfractovibrométrie a été testé à l'occasion d'un stage de master [DEA6]. Une limitation majeure de cette approche est liée au fait que la pression acoustique est moyennée sur le trajet du faisceau. Une mesure quantitative ne peut être effectuée par conséquent que dans des champs acoustiques à 2 dimensions, le laser évoluant selon la troisième. Une comparaison avec une mesure microphonique, réalisée en tube de kundt, a permis de valider l'expression (3.1) (cf. figure 3.2, gauche). La méthode a également été validée dans une cavité cylindrique (cylindre de 10cm de diamètre et 10cm de longueur, fermé par des plaques en polycarbonate transparentes). Les modes acoustiques d'indice 0 sur la longueur du cylindre ont pu être mis en évidence à partir d'une mesure en balayage (figure 3.2, droite).

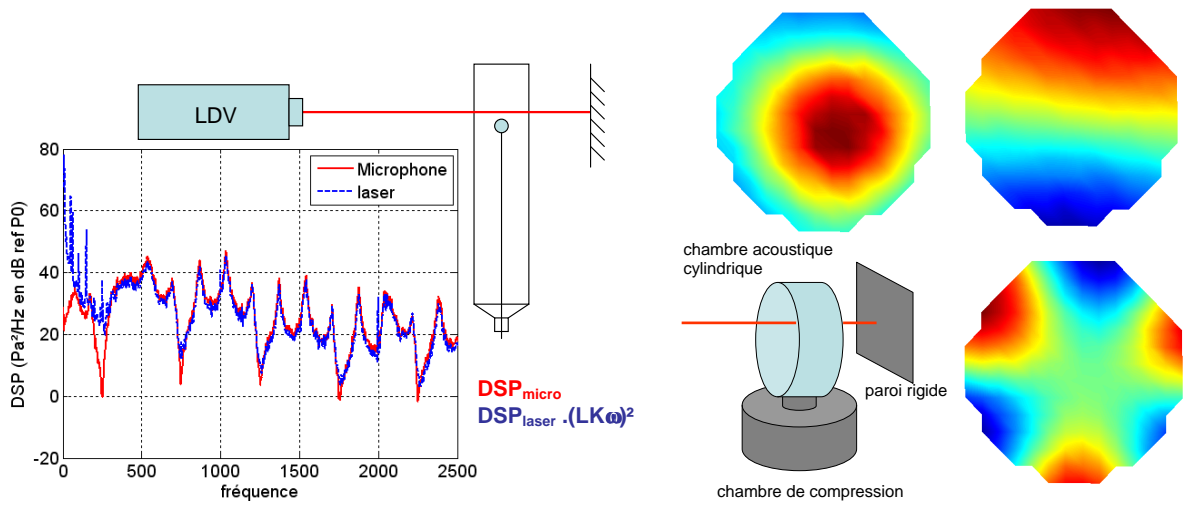


FIGURE 3.2 – A gauche : comparaison spectre de niveau de bruit en tube de kundt obtenu au microphone et au laser. A droite : cartographies de modes d’une cavité cylindrique obtenues par réfractovibrométrie.

3.2 contribution aux méthodes d'holographie acoustique

Publications & communications : [P7, P8, P12, P13]

Collaboration(s) industrielle(s) : PSA [R6]

Partenaire(s) académique(s) : Technical University of Denmark

Encadrement(s) : [PFE7]

Nous présentons ici les contributions apportées aux techniques d'holographie acoustique basées sur la transformée de Fourier Discrete (TFD) spatiale du champ acoustique mesuré sur une antenne plane à maillage régulier. Initialement proposée par Williams *et al.*² au début des années 1980, l'holographie acoustique se base sur la décomposition suivante :

$$P(x, y, z, \omega) = \sum_n \sum_m P_{nm}(z, \omega) e^{jk_{nx}x} e^{jk_{my}y}, \quad (3.2)$$

avec z la direction normale au plan de mesure, $k_{nx} = 2\pi n/L_x$, $k_{my} = 2\pi m/L_y$, et n, m des entiers variant dans des limites fixées par la résolution spatiale de l'antenne. L'injection de cette décomposition dans l'équation de Helmholtz mène à l'équation suivante

$$P_{nm}(z, \omega) = P_{nm}^+(0, \omega) e^{jk_{nmz}z} + P_{nm}^-(0, \omega) e^{-jk_{nmz}z}, \quad (3.3)$$

avec $k_{nmz}^2 = (\omega/c)^2 - k_{nx}^2 - k_{my}^2$. Pour k_{nmz}^2 positif (avec $k_{nmz} = +\sqrt{k_{nmz}^2}$), les deux termes P_{nm}^+ et P_{nm}^- représentent des ondes se propageant selon $+z$ et $-z$, respectivement, si l'on utilise une convention de dépendance en temps en $e^{-j\omega t}$. Une valeur négative (resp. positive) de k_{nmz}^2 (avec $k_{nmz} = +j\sqrt{-k_{nmz}^2}$) implique un comportement évanescent (resp. propagatif) des ondes (exponentielles réelles (resp. complexes) dans (3.3)).

En holographie simple information (le cas classique de la pression acoustique mesurée dans un plan), on utilise comme information a priori le fait que la source se situe du côté $z_s < z_h$, où z_h est l'abscisse du plan de mesure et z_s celle de la source. Dans ce cas, on peut supposer P_{nm}^- nul (pas d'onde propagée vers la source, pas d'onde évanescence augmentant de manière exponentielle en s'éloignant de la source). Le champ de pression peut être alors être reconstruit à n'importe quelle valeur de $z > z_s$, notamment au voisinage direct de z_s , donnant une représentation de la pression acoustique dans le plan source :

$$P_{nm}(z_s, \omega) = P_{nm}(z_h, \omega) e^{jk_{nmz}(z_s - z_h)}. \quad (3.4)$$

La principale difficulté est liée à la rétropropagation des ondes évanescences, nécessaire pour obtenir une bonne résolution, mais à l'origine d'une forte sensibilité de la méthode aux erreurs de mesure. Un filtrage passe bas dans le domaine des nombres d'ondes doit être finement adapté pour optimiser le compromis résolution-stabilité. l'équation d'Euler nous permet par ailleurs d'exprimer le champ de vitesse particulière normal à l'hologramme :

$$V_{nm}^z(z, \omega) = \frac{-j}{\omega\rho} \frac{\partial P_{nm}(z, \omega)}{\partial z} = \frac{k_{nmz}}{\omega\rho} P_{nm}(z, \omega) \quad (3.5)$$

2. E.G. Williams, J.D. Maynard, and E. Skudrzyk. Sound source reconstructions using a microphone array. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(4) :340-344, 1980.

Cette équation permet par exemple d'identifier le champ de vitesse vibratoire de la source. Il faut noter que cette opération nécessite une multiplication par k_{nmz} , qui amplifie encore plus les hauts nombre d'ondes, et donc le bruit de mesure.

3.2.1 Atténuation des effets de fenêtrage spatial par extrapolation du champ acoustique

Un inconvénient majeur de l'utilisation de la TFD est que la décomposition obtenue est doublement périodique (cf. eq. 3.2), selon les dimension x et y . Cette périodicité artificielle implique discontinuités non physiques sur les bords de l'hologramme. Si la taille du maillage de mesure est grande devant la taille de la source étudiée, une atténuation géométrique suffisante peut être attendue sur les bords, rendant l'effet des discontinuités négligeable. Mais généralement, ces discontinuités sont supprimées par fenêtrage spatial (fenêtres d'apodisation de type Hanning ou Tukey). Ce fenêtrage a un effet néfaste sur la quantité d'information exploitée, car le nombre de points de mesures en holographie acoustique est relativement faible : dans le cas d'une antenne de 64 (8 par 8) microphones, l'utilisation d'une fenêtre d'apodisation revient à simplement annuler (ou fortement atténuer suivant le fenêtrage choisi) les données mesurées sur la frontière (soit 28 microphones, presque la moitié des données!).

Une solution a été proposée par Williams en 2003³, basée sur l'extrapolation de l'hologramme mesuré. L'idée est de partir d'une extension par zero-padding classique de l'hologramme. Cet hologramme étendu est ensuite filtré passe-bas dans le domaine des nombres d'ondes pour atténuer les discontinuités aux bords de l'hologramme mesuré. L'hologramme original (mesuré) est ensuite réinjecté dans l'hologramme étendu, et ainsi de suite jusqu'à convergence du résultat. Un fenêtrage spatial peut être utilisé, de type Tukey, qui permet de laisser intact l'hologramme mesuré et d'atténuer seulement la partie extrapolée du champ. Une illustration de cette approche est donnée en figure 3.3, extrait de [P8]. Le but de cette étude académique, réalisée dans le cadre d'un contrat PSA [R6], était de voir dans quelle mesure il était possible de remonter à la vitesse vibratoire d'une structure à partir de mesures acoustiques. La taille de l'hologramme était significativement inférieure à la taille de la source, ce qui rendait nécessaire l'utilisation de ce type d'approche, qui a permis de réduire de manière très significative l'erreur sur la vitesse reconstruite.

3.2.2 Holographie acoustique basée sur la mesure du champ de vitesse acoustique

Depuis maintenant une dizaine d'années, la mesure directe de la vitesse particulière est possible grâce à des capteurs basés sur la technologie MEMS (cf. capteurs Microflown, section 2.3.1). Le principe est celui des capteurs à fil chaud : le mouvement acoustique autour d'un fil chaud génère un refroidissement mesurable du fil. L'utilisation de deux fils chauds parallèles proches permet de mesurer en plus la direction du mouvement du fluide. La mesure de vitesse peut également être faite par des doublets microphoniques, ou encore

3. E.G. Williams. Continuation of acoustic near-fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 113 :1273–1281, 2003.

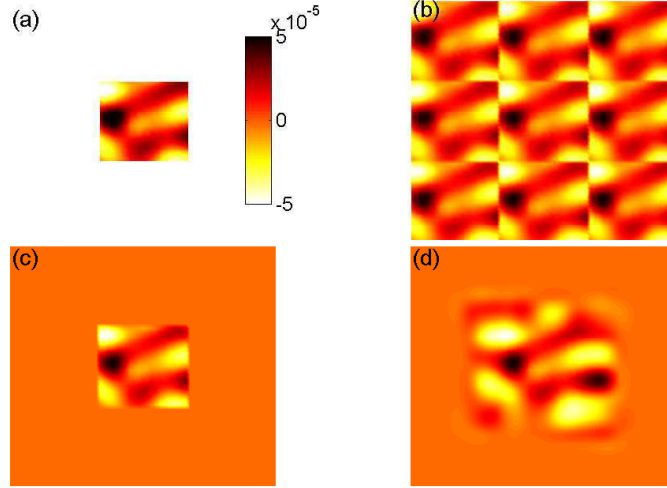


FIGURE 3.3 – Hologramme de vitesse acoustique à 5cm d’une plaque excitée par un pot vibrant (partie réelle, 890 Hz). (a) : mesure, (b) : périodisation TFD, (c) : zero-padding, (d) : hologramme extrapolé. Tiré de [P8]

en utilisant une membrane ultra-légère et un vibromètre laser Doppler (cf. section 3.1.1). L’utilisation de l’information de vitesse acoustique normale ne pose pas de difficulté particulière, et se fait de manière analogue à l’holographie basée sur la pression :

$$V_{nm}(z, \omega) = V_{nm}(z_h, \omega)e^{jk_{nmz}(z-z_h)}. \quad (3.6)$$

valable pour $z > z_s$ abscisse de la source, et en conservant l’hypothèse que la source placée à une abscisse inférieure au plan de mesure $z_s < z_h$.

L’holographie acoustique basée sur la vitesse particulière n’est étudiée que depuis quelques années, notamment par Jacobsen & Liu⁴. Un premier intérêt de l’holographie basée sur la mesure de vitesse normale est que les capteurs de vitesse acoustique sont des capteurs directs, mesurant la vitesse normale au plan de mesure. Cela se traduit dans le plan de Fourier par un meilleur rapport signal sur bruit dans les hauts nombres d’ondes (par rapport à l’holographie basée sur la pression, cf. Equation 3.5). La décroissance de la vitesse normale en s’éloignant de la source dans le plan de mesure est en outre plus rapide, ce qui permet d’atténuer les problèmes de discontinuités générées par la périodisation de la TFD (cf. section 3.2.1).

Si l’objectif est d’identifier la vitesse vibratoire d’une source, l’holographie basée sur la vitesse acoustique nécessite moins de régularisation que l’holographie basée sur la pression, car l’opération de multiplication par le nombre d’onde (Equation 3.5) n’est pas nécessaire. Les avantages de l’holographie basée sur la vitesse ont été mis en évidence expérimentalement dans le cadre d’une expérience de validation, [P8]. La démarche a également été utilisée dans le cadre de l’holographie acoustique basée sur la mesure de vitesse acoustique à l’aide d’une membrane ultralégère [P7], cf. section 3.4.

4. F. Jacobsen and Y. Liu. Near field acoustic holography with particle velocity transducers. *Journal of the Acoustical Society of America*, 118(5) :3139–3144, 2005.

On a vu dans la section précédente comment transformer un hologramme de pression en hologramme de vitesse (Equation 3.5), et la problématique induite par l'amplification des hauts nombres d'ondes. On peut également effectuer l'opération inverse, c'est à dire obtenir l'hologramme de pression à partir de l'hologramme de vitesse :

$$P_{nm}(z, \omega) = \frac{\omega \rho}{k_{nmz}} V_{nm}^z(z, \omega) \quad (3.7)$$

Cette opération ne pose a priori pas de problème, car la division par le nombre d'onde réduit k_{nmz} est équivalent à un filtrage passe bas, ce qui a tendance à atténuer le bruit. Il y a cependant un problème car le nombre d'onde réduit k_{nmz} peut s'annuler, lorsque le nombre d'onde d'une harmonique de la décomposition de Fourier 2D ($\sqrt{k_x^2 + k_y^2}$) est très proche du nombre d'onde acoustique ($k_{ac} = \omega/c$). Cette harmonique représente une onde plane tangentielle au plan de mesure : sa composante normale de vitesse acoustique est donc théoriquement nulle. Ce n'est pas le cas expérimentalement, à cause du bruit de mesure mais également à cause du caractère discret de la décomposition. Cette problématique a été soulevé par Williams et Maynard⁵ dans le cadre du calcul de l'intégrale de Rayleigh via la TFD. Le problème est qu'une opération continue dans le plan de Fourier (division par k_{nmz}) est appliquée à des données discrètes issues de la TFD. Une solution est d'utiliser un opérateur moyenné, de manière à supprimer la singularité. Cette solution a été étudiée et validée expérimentalement dans le cadre du stage de fin d'étude d'Antonio Pereira [PFE7, P12], qui portait sur la mesure du champ de pression acoustique à partir de la mesure de vitesse vibratoire d'une membrane.

3.2.3 Correction de la masse surfacique d'une membrane

L'utilisation d'une membrane ultra-légère pour mesurer la vitesse particulière, décrite en section 3.1.1 est une mesure relativement intrusive : la membrane réfléchit une partie des ondes acoustiques incidentes. Il est cependant possible de corriger l'atténuation de vitesse induite par la masse de la membrane. Le bilan des forces par unité de surface sur la membrane est :

$$P_i(x, y, z_m, \omega) + P_r(x, y, z_m, \omega) - P_t(x, y, z_m, \omega) = -j\omega\mu V^m(x, y, \omega),$$

où la pression au point x, y, z_m est décomposée en une pression incidente P_i , réfléchiée P_r et transmise P_t , et où V^m représente la vitesse de la membrane. Ce bilan, ainsi que la prise en compte de la continuité des vitesses, permet d'aboutir à l'estimation de la vitesse acoustique de l'onde incidente uniquement pour chaque composante n, m :

$$V_{i\ nm}^z(\omega) = V_{nm}^m(\omega) \left(1 - \frac{j\mu k_{nmz}}{2\rho} \right),$$

où $V_{i\ nm}^z$ représente la vitesse acoustique de l'onde incidente. On notera que le module de la correction est ≥ 1 , pour les ondes propagatives ou évanescentes. La correction est inactive pour le cas $k_{nmz} = 0$: il s'agit des ondes tangentielles qui n'induisent aucun mouvement

5. E. G. Williams and J.D. Maynard. Numerical evaluation of the rayleigh integral for planar radiators using the fft. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72 :2020–2030, 1982.

de la membrane, pour lesquelles on a théoriquement une vitesse de membrane nulle. Cette correction a été validée expérimentalement [P7]. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 3.4, pour une source académique (3 monopoles corrélés).

Il a cependant été constaté que la correction de masse ne prend pas en compte les ondes

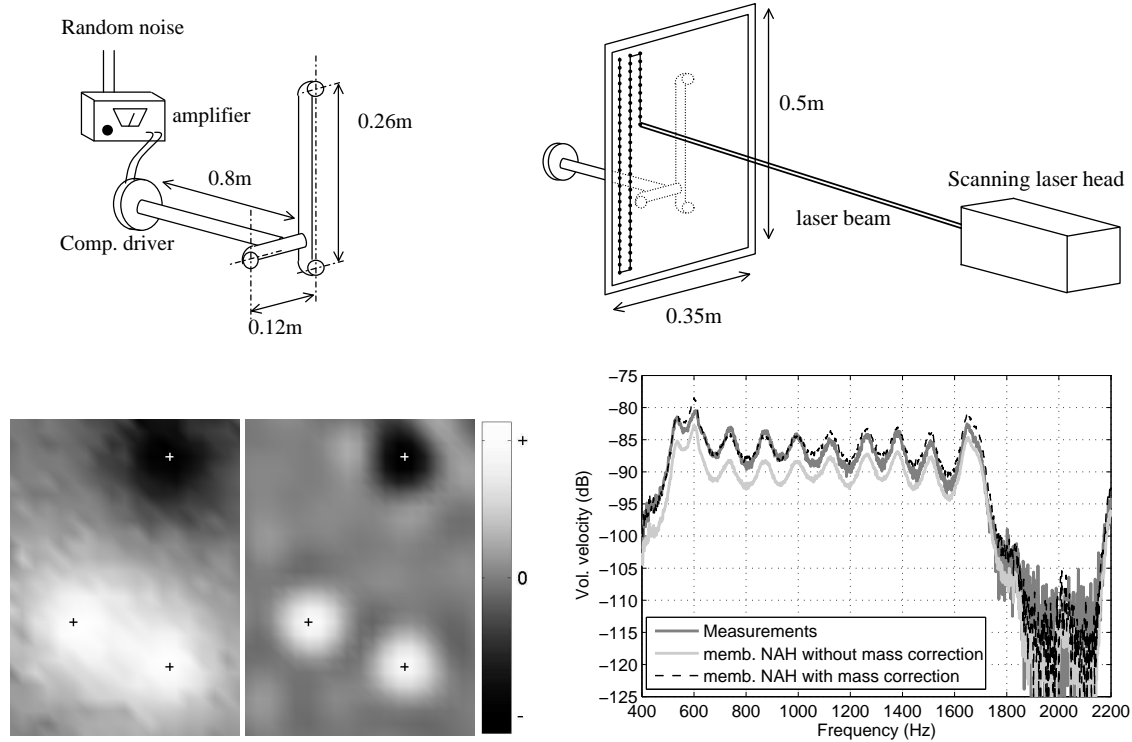


FIGURE 3.4 – Validation de la mesure de vitesse acoustique sur membrane légère. Haut gauche : Source étudiée, haut droit : setup expérimental. Bas gauche : vitesse mesurée et rétropropagée à 1kHz, Bas droit : spectre de débit d’une source identifié avec et sans correction de masse confronté à une mesure directe. Tiré de [P7]

réfléchies par la membrane qui sont à nouveau réfléchies par la source, et se repropagent donc vers la membrane, modifiant l’onde incidente. Cet effet, qui avait été constaté dans [C11, P4], génère des ondes stationnaires entre la membrane et la source, phénomène particulièrement gênant. La problématique de minimisation de masse de la membrane reste donc une préoccupation fondamentale pour cette approche. La méthode fonctionne néanmoins très bien sur des sources peu réfléchissantes.

3.2.4 Intensimétrie supersonique

L’intensimétrie supersonique, introduite par Williams en 1995⁶, est une approche visant à identifier les zones d’une source acoustique responsable d’un rayonnement efficace en champ lointain. Comme nous l’avons vu précédemment, une source peut générer deux types d’ondes : des ondes évanescentes, dont l’amplitude décroît de manière exponentielle

6. E.G. Williams. Supersonic acoustic intensity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1) :121–127, 1995.

avec la distance à la surface source, et des ondes propagées qui sont responsables du bruit rayonné par la source en champ lointain. Les vibrations d'une structure peuvent générer des ondes évanescentes (resp. propagées), lorsque les longueurs d'ondes vibratoires sont plus petites (resp. plus grandes) que la longueur d'onde acoustique. Pour les sources planes, cela se traduit dans le domaine des nombre d'ondes : l'énergie des vibrations de nombre d'onde $\sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ inférieur (resp. supérieur) au nombre d'onde acoustique est propagée (resp. non propagée) vers le champ lointain. Le cercle dans le plan des nombres d'ondes défini par $k_x^2 + k_y^2 = k_{ac}^2$ constitue une limite entre la partie propagée des ondes (à l'intérieur du cercle) et la partie évanescente (à l'extérieur). Les longueurs d'ondes responsables du champ propagé étant plus grandes que la longueur d'onde acoustique, leur vitesse de phase est supérieure à la vitesse du son : elles sont supersoniques. La terminologie d'intensimétrie supersonique désigne donc l'étude de l'intensité acoustique générée par les vibrations ayant un rayonnement acoustique efficace.

L'obtention de l'intensité supersonique nécessite la suppression des composantes du champ vibratoire générant un rayonnement évanescent. Ce filtrage se fait naturellement si l'on effectue une mesure d'antennerie acoustique à une certaine distance de la source. Les images acoustiques obtenues par rétropropagation sont alors des sources équivalentes, qui ne contiennent pas les composantes évanescentes. Un exemple, tiré de [C8], montre un champ de vitesse vibratoire d'une plaque bafflée, et la source équivalente identifiée pour deux fréquences différentes (cf. figure 3.5).

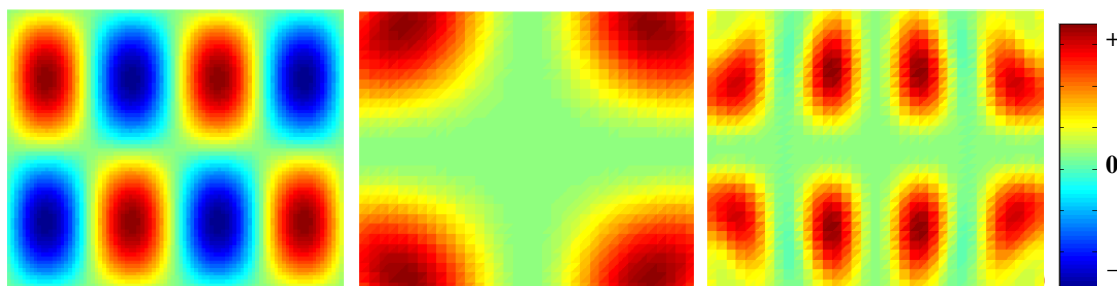


FIGURE 3.5 – A gauche : vitesse vibratoire d'une plaque rectangulaire 0.6*0.5m (mode 4,2). Au centre : intensité de la source identifiée à 600Hz ($\lambda_{ac} > \lambda_{plaque}$). A droite : intensité de la source identifiée à 1200Hz ($\lambda_{ac} < \lambda_{plaque}$). Tiré de [C8]

La première fréquence se situe en dessous de la fréquence critique ($\lambda_v < \lambda_{ac}$), le résultat (obtenu suivant la méthode décrite en section 3.3.1 de ce mémoire) est une source équivalente, on identifie les zones responsables du rayonnement en champ lointain (les coins de la plaque). La seconde fréquence est au dessus de la fréquence critique, la cartographie d'intensité est cette fois représentative du champ de vitesse vibratoire.

L'intensité supersonique peut être obtenue directement à partir du champ de vitesse vibratoire de la source. Cette possibilité est étudiée numériquement et expérimentalement dans [P13]. Dans cet article, une formulation de filtrage des composantes évanescente est proposé directement dans l'espace physique, réalisé à la fois sur la vitesse vibratoire et la pression acoustique pariétale. Les résultats expérimentaux montrent des sources équivalentes représentant les zones responsable du rayonnement efficace de la source.

3.3 contribution aux méthodes d'imagerie par sources équivalentes

Publications & communications : [P5, P10, C6, C7, C8, C14, C15, C23, C24, C33, CN5]

Collaboration(s) industrielle(s) : Renault [R2], 01dB Metravib, Renault Trucks, IFP [R4], MicrodB [E1]

Partenaire(s) académique(s) : LAUM (Univ. du Maine), LAM/IJLRA, (Univ. Paris 06)

Encadrement(s) : [PFE8, T3, T5]

L'imagerie acoustique par sources équivalentes est une méthode basée sur la reconstruction d'un champ acoustique mesuré à partir de la superposition des ondes produites par un certain nombre de sources élémentaires. Le principe général de superposition, proposée par Koopman *et al.*⁷ dans les années 80 trouve de nombreuses applications, en spatialisation du son par exemple ou encore pour les problèmes de localisation de sources.

Le principe d'imagerie acoustique par sources équivalentes est d'identifier les débits acoustiques de sources élémentaires (monopoles, dipôles), positionnées au voisinage (ou à l'intérieur) de la source physique étudiée, à partir de mesures acoustiques. Il s'agit d'un problème inverse, formellement identique au problème d'identification de forces excitant une structure décrit au paragraphe 2.1 :

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{q}, \quad (3.8)$$

où \mathbf{p} et \mathbf{q} représentent respectivement les pressions acoustiques mesurées et les débits à identifier, et \mathbf{G} la matrice de transfert acoustique. L'inversion de ce système peut nécessiter une régularisation en basses fréquences, si la distribution de sources choisie est trop fine par rapport à la longueur d'onde. Un exemple d'application de ce type de problème, ainsi que la méthode de régularisation permettant de choisir le paramètre de Tikhonov (méthode de la courbe en L⁸) sont présentés dans les travaux [C15, P10]. Il s'agissait de cartographier les principales sources acoustiques d'une harpe de concert. La géométrie du problème, ainsi que les résultats obtenus, sont présentés sur la figure 3.6.

cette étude a permis de valider le fait que la source équivalente de la harpe a tendance à monter selon l'axe du corps de l'instrument en fonction de la fréquence, de 100Hz à 1kHz.

3.3.1 Résolution d'un problème inverse largement sous déterminé

Une approche permettant de localiser les sources principale de rayonnement d'une surface se base sur le positionnement d'un grand nombre de sources élémentaires sur cette surface. Une forte densité de sources élémentaires permet en effet de représenter correctement une distribution continue de source (satisfaisant les critères d'échantillonnage vis à

7. G. H. Koopmann, L. Song, and J. B. Fahline. A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition. *Journal of the Acoustical Society of America*, 86(6), 1989.

8. P.C. Hansen. *Rank-Deficient And Discrete Ill-Posed Problems*. SIAM, 1998.

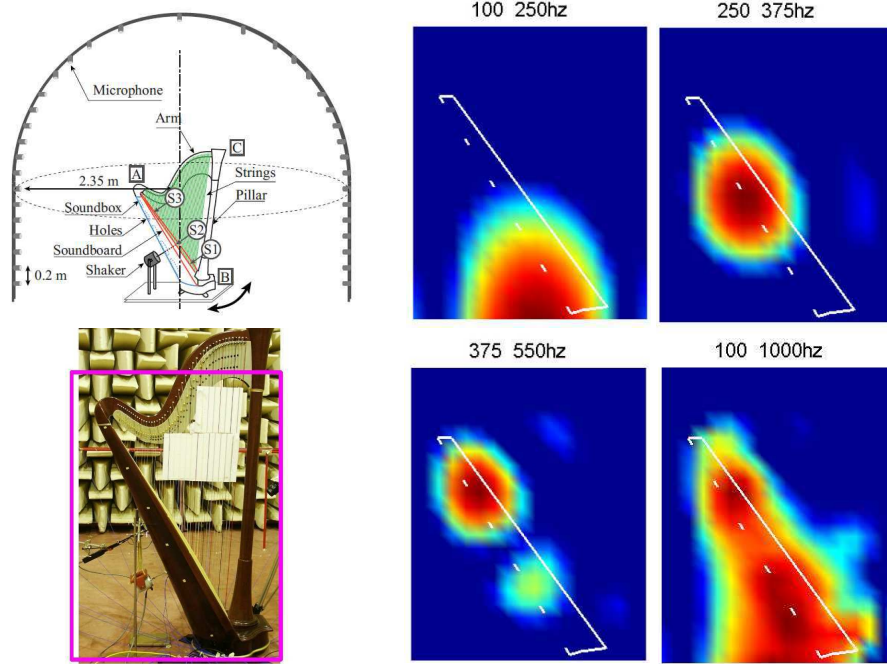


FIGURE 3.6 – Imagerie acoustique d’une harpe de concert. A gauche : géométrie du problème et photographie de la harpe. A droite : cartographie de puissance par bandes de fréquences (Dynamique de l’image 10dB). Tiré de [P10]

vis des longueurs d’ondes acoustiques et vibratoires). L’inconvénient est que le nombre de microphone utilisés est souvent limité (quelques dizaines), alors que le nombre nécessaire de sources élémentaires peut être bien plus grand (quelques centaines), ce qui rend le problème largement sous-déterminé (beaucoup plus d’inconnues que de données). La décomposition en valeurs singulières (SVD) peut être utilisée dans ce cas de figure pour construire une base de distributions de sources orthogonales, qui par composition linéaire permet de reconstruire une image de la source sur l’ensemble des sources élémentaires considérées.

$$\mathbf{p}_m = \mathbf{U}_{mn} \mathbf{S}_{mm} \mathbf{V}'_{mn} \mathbf{q}_n, \quad \text{avec } n \gg m \quad (3.9)$$

Dans l’équation (3.9), les colonnes de \mathbf{V} représentent les distributions de sources (dont le nombre est égal au nombre de microphones) sur la base desquelles l’identification est réalisée. Un exemple de ces distributions de sources obtenues grâce à la SVD est donné en figure 3.7.

Le système à résoudre devient carré (autant d’inconnues que d’équations) et peut être résolu avec régularisation si besoin. Cette approche de pseudo-inverse sous-déterminée est classique en analyse numérique⁹, et fournit (sans régularisation) la solution de norme L_2 minimale. On ne parle plus de solution au sens des moindres carrés, car le système est sous déterminé et possède donc un nombre infini de solutions exactes. La notion de minimisation d’erreur de reconstruction réapparaît dès lors qu’un paramètre de régularisation

9. G.H. Golub and C.F. Van Loan. *Matrix computation*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, 1983.

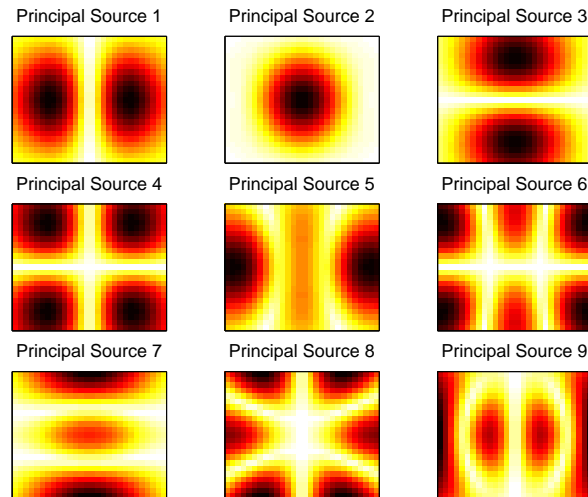


FIGURE 3.7 – Sources principales obtenues à partir d’une distribution de monopoles. Tiré de [P5]

est introduit, qui la met en balance avec la minimisation de l’énergie de la solution : on tolère une erreur moindre carrés non nulle au profit d’un fort abaissement de la norme de la solution. Le principe général de la méthode, appliqué à l’antennerie acoustique, est décrit dans l’article [P5]. Plusieurs communications en congrès en illustrent les capacités sur des cas académiques [C6, CN5, C8].

La méthode a également été mise en œuvre dans un cas industriel, dans le cadre d’un contrat Renault [R2] dont l’objectif était de cartographier la puissance acoustique d’un moteur essence. Les difficultés étaient nombreuses : la source devait être cartographiée dans son intégralité, ce qui impliquait 5 positions différentes de l’antenne acoustique utilisée (30 microphones). De plus, la complexité statistique du champ rayonné (de nombreuses sources décorréélées sont à l’origine du bruit de moteur essence), a nécessité l’utilisation de 5 microphones de référence (fixes d’une position d’antenne à l’autre). Deux configurations moteur différentes ont été étudiées, dans le but d’évaluer l’effet de solutions d’amélioration. La méthode s’est avérée particulièrement robuste, permettant de quantifier et localiser les améliorations apportées. Les deux configurations moteur, ainsi que les résultats de cartographie de puissance globale en dB(A) sont donnés en figure 3.8.

3.3.2 Application à l’antennerie sphérique

L’antennerie sphérique se base sur le positionnement de microphones selon une géométrie sphérique, ce qui lui permet de couvrir un angle solide de 4π . L’antennerie sphérique est utilisée pour la localisation de sources dans les locaux ou habitacles. Le support physique des microphones peut être solide : les microphones sont alors montés affleurant sur une sphère rigide. L’avantage de la sphère rigide est qu’elle introduit une directivité au microphone (bafflé par la sphère), ce qui a pour effet d’augmenter la résolution. La possibilité d’appliquer la méthode de sources équivalentes à l’antennerie sphérique

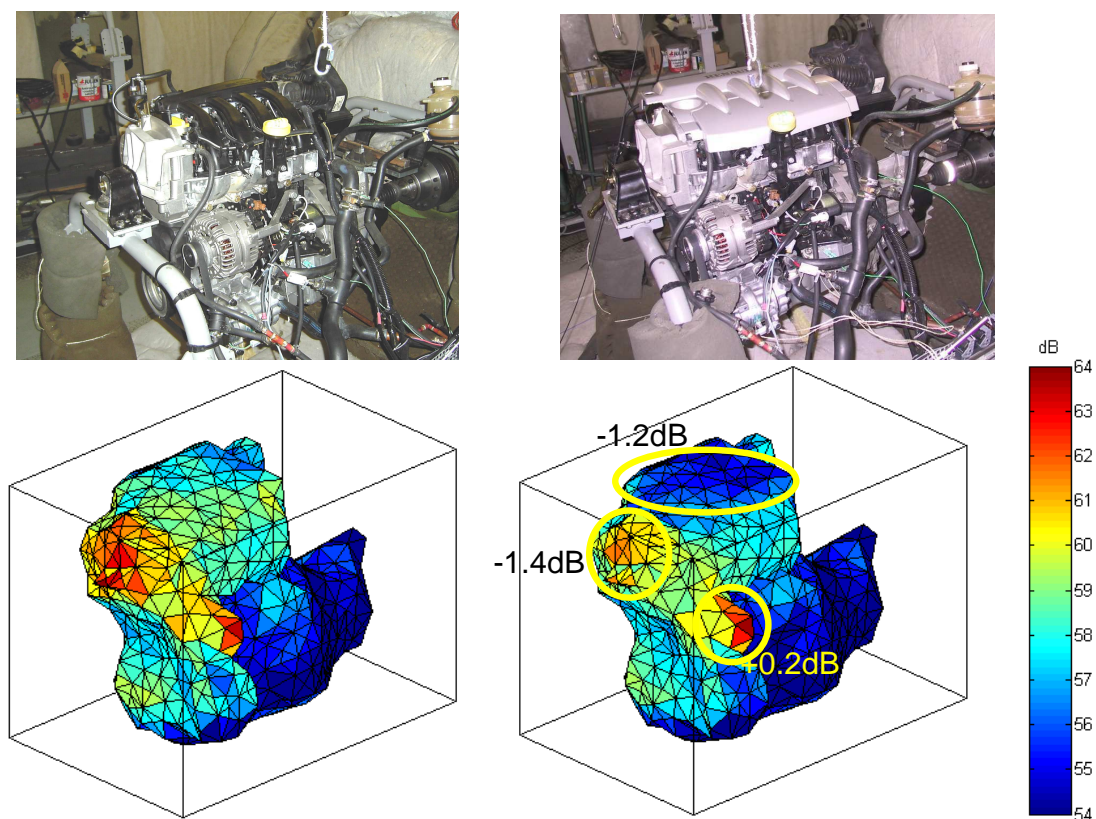


FIGURE 3.8 – Deux configurations d’habillage moteur, et leurs cartographies de puissance acoustique en dB(A). Tiré de [R2]

constitue le sujet de thèse d’Antonio Pereira [T3] (soutenance prévue en 2013), dans le cadre du projet ACOUBUS [E1]. Le principe est de distribuer des sources élémentaires sur les faces internes de la géométrie du local étudié. Les fonctions de transfert entre sources élémentaires et les microphones de la sphère sont calculées avec une hypothèse de champ libre, en tenant compte du baffle sphérique sur chaque microphone [C23]. Les sources sont alors identifiées par la méthode décrite en section 3.3.1.

Le choix de la géométrie de l’antenne (diamètre, position des microphones) est un compromis entre résolution basses et hautes fréquences. Si l’on souhaite avoir une bonne résolution à basse fréquence, il faut augmenter la taille de l’antenne, et si l’on veut monter en hautes fréquences, il faut réduire la distance inter-microphones. Le choix de l’agencement des microphones est important et doit être fait de manière à avoir la répartition la plus homogène possible. Un critère supplémentaire a été utilisé au cours du travail d’Antonio Pereira : pouvoir augmenter le nombre de microphones de l’antenne en faisant deux acquisitions successives en appliquant une simple rotation de la sphère. Ces différents critères, ainsi que le nombre de microphones disponibles, on conduit au choix d’une répartition de microphones aux centres des faces d’un icosaèdre tronqué (géométrie typiquement utilisée pour les ballons de football). L’icosaèdre possède 32 faces, 31 seront équipées de microphones et la 32^{ème} sera utilisée pour le pied. Une représentation de l’icosaèdre tronqué, du maillage microphonique obtenu avec deux positions d’antennes et une photographie de

l'antenne réalisée sont donnés en figure 3.9.

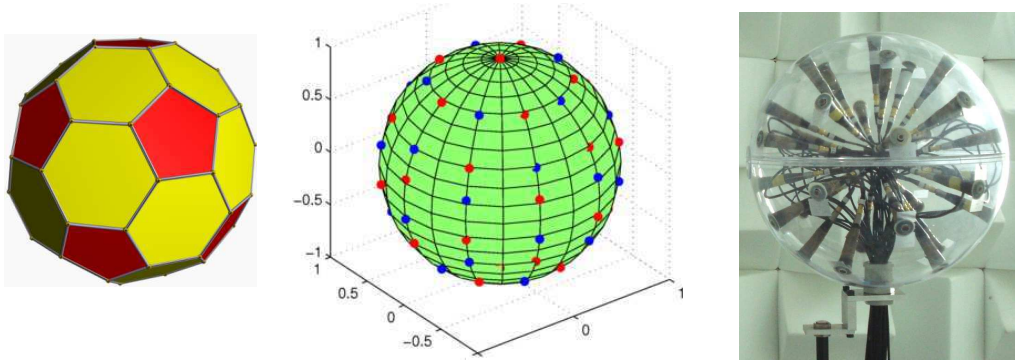


FIGURE 3.9 – Géométrie de l'antenne sphérique. A gauche : l'icosaèdre tronqué. Au centre : maillage microphonique augmenté par rotation de $\pi/5$. A droite : photographie de l'antenne réalisée.

Des simulations numériques, ainsi que des validations expérimentales ont permis d'apporter quelques améliorations et adaptations au principe de base de la méthode de sources équivalentes. Il a été constaté que la méthode de régularisation utilisée avait tendance à privilégier les sources élémentaires les plus proches de l'antenne (lorsque l'antenne est plus proche d'une des parois du local). Le principe de la régularisation est en effet de minimiser l'énergie de la solution. Les sources les plus proches de l'antenne sont par conséquent privilégiées car elles nécessitent moins d'énergie que les sources éloignées, pour produire un niveau de pression équivalent sur l'antenne. Une pondération a par conséquent été introduite dans le système 3.8 :

$$\mathbf{p} = \mathbf{G}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{W}\mathbf{q} = \mathbf{G}_w\mathbf{q}_w, \quad (3.10)$$

où W représente la matrice diagonale de pondération. La décomposition en valeurs singulières est faite alors sur \mathbf{G}_w . Chaque terme de la matrice de pondération est égal à l'inverse de la distance entre chaque source élémentaire et le centre de la sphère.

$$W_i = \langle R_{ij}^{-1} \rangle_j$$

Cette pondération s'est avérée essentielle lors de validations numériques et expérimentales [C23].

Une limitation de l'approche fortement sous déterminée est cependant apparue lors de ces validations académiques : la méthode permet de localiser correctement les sources, mais les puissances acoustiques identifiées sont fortement sous-estimées. Après analyse, il s'est avéré que la source reconstruite est fortement directive, avec un lobe de rayonnement orientée vers l'antenne. L'approche régularisée consiste en effet en la minimisation de l'énergie de la solution : le meilleur moyen de minimiser l'énergie de la source est d'envoyer de l'énergie dans la direction de l'antenne uniquement (cf. [C33]).

La méthode de pondération décrite précédemment pour la correction de l'effet de distance a été appliquée dans le but d'améliorer la résolution du système. L'idée est d'adopter une

démarche itérative : l'identification à l'itération n est pondérée par le résultat à l'itération $n-1$. Autrement dit, on pénalise à l'itération n les zones identifiées comme peu rayonnantes à l'itération $n-1$.

$$\mathbf{p}_n = \mathbf{G} \mathbf{I} \mathbf{q}_{n-1} (\mathbf{I} \mathbf{q}_{n-1})^{-1} \mathbf{q}_n = \mathbf{G}_{wn} \mathbf{q}_{wn}. \quad (3.11)$$

Cette approche itérative, quoique coûteuse en temps de calcul, permet d'améliorer à la fois la résolution du système et l'aspect quantitatif : les sources obtenues sont plus réduites en surface et moins directives. Un exemple de résultat obtenu expérimentalement est illustré en figure 3.10.

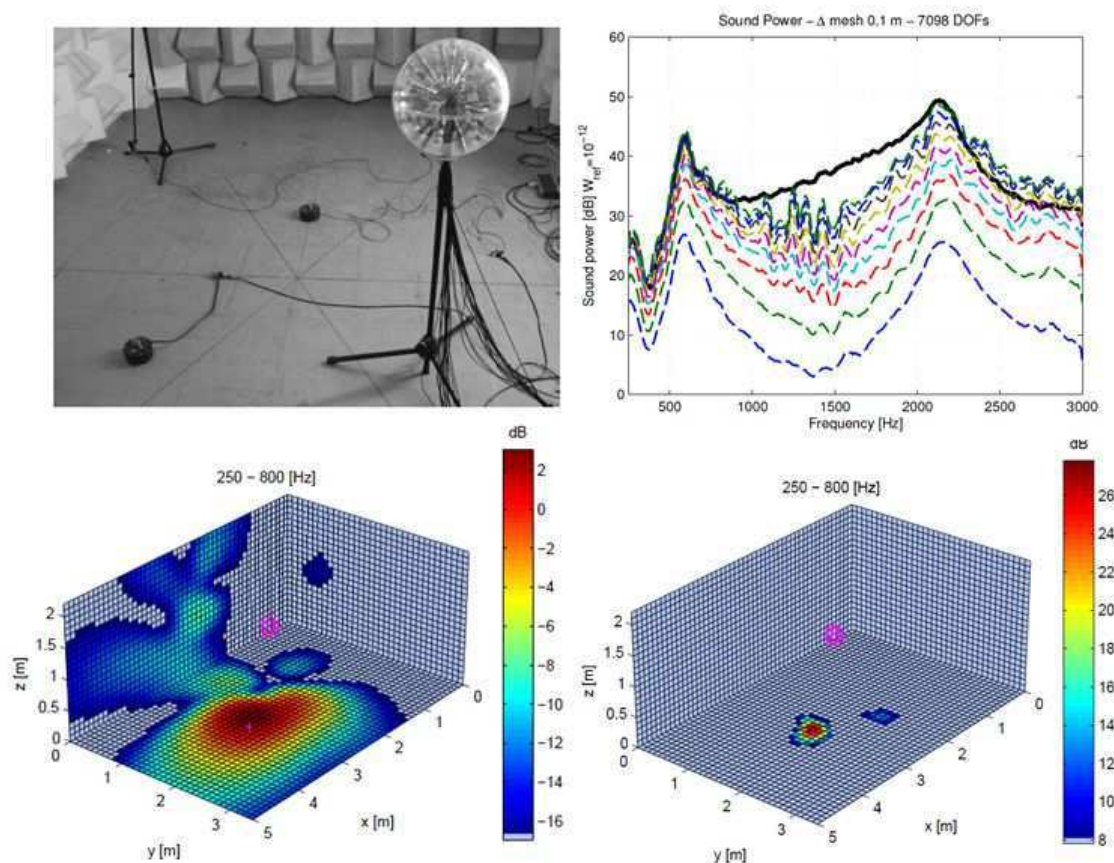


FIGURE 3.10 – Haut, gauche : setup expérimental (antenne + deux sources au sol). Haut, droit : puissance d'une source (préalablement caractérisée) (noir), puissance identifiée à chaque itération (pointillés). Bas : cartographies des débits identifiés à la première (gauche) et 8ème (droite) itération. Tiré de [C33]

Les méthodes développées dans le cadre de la thèse d'Antonio Pereira sont valorisées industriellement par l'entreprise MicrodB, partenaire du projet Acoubus. Des essais ont été conduits dans le cadre de ce projet sur un bus en roulage, dans le but de localiser les sources principales dans une démarche de réduction du bruit à l'intérieur de l'habitacle. Des premiers résultats, présentés en congrès [C33], sont très encourageants.

Projets et perspectives

L'objectif de ce dernier chapitre est de donner un aperçu de mon projet de recherche à court et moyen terme, les projets récemment démarrés, les potentiels de développement des thématiques abordées dans ce mémoire ainsi que les nouveaux sujets de recherche envisagés.

L'essentiel des méthodes et outils présentés dans ce mémoire ont été confrontés au contexte industriel. Cet aspect est à mon avis fondamental dans le cadre de développements de méthodologies, car l'application industrielle permet de mettre en évidence le potentiel réel et les éventuels points faibles des outils proposés. Mon objectif est par conséquent de poursuivre mes travaux en lien étroit avec le monde industriel, dont les problématiques constituent, par ailleurs, un véritable réservoir de sujets de recherche appliquée.

Les différentes méthodes de caractérisation de source exposées dans ce mémoire se sont révélées dans bien des cas complémentaires. Une suite logique de ces travaux sera de combiner différentes approches de manière à optimiser le diagnostic, typiquement utiliser des résultats de séparation de sources obtenus par approches statistiques pour ensuite appliquer des outils d'identification vibratoire ou acoustique. Cette démarche est d'ores et déjà adoptée lors de récents travaux sur la combinaison d'une méthode d'imagerie acoustique pour l'analyse de voies de transfert [C29], ou encore sur l'application d'holographie acoustique couplée à du filtrage de Wiener pour le diagnostic du bruit de combustion d'un moteur Diesel [C34].

L'aspect régularisation du problème inverse reste un sujet d'actualité pour les démarches d'identification de sources. La méthode utilisée pour l'essentiel des travaux présentés dans ce mémoire se base sur le filtrage des composantes considérées comme responsables de l'hypersensibilité. Ce filtrage se fait soit sur une base de Fourier, comme pour l'holographie conventionnelle ou la méthode RIFF, ou sur des bases issues de la diagonalisation de systèmes linéaires (typiquement la décomposition en valeurs singulières). Le principe de régularisation de Tikhonov permet d'ajouter un critère de minimisation de l'énergie de la solution pour trouver le meilleur compromis avec la minimisation de l'erreur de reconstruction ; ce compromis peut être déterminé par une analyse du type courbe en L. On pourrait qualifier ces approches de déterministes, visant à obtenir la solution qui possède les meilleures performances par rapport aux critères de sélection. Il existe des alternatives, dites bayésiennes, qui permettent d'obtenir une solution sous forme de densité de probabilité (permettant de donner par conséquent des marges d'erreur). Cela consiste en la maximisation du produit de la vraisemblance d'une solution (probabilité que la solution ait donné le résultat observé) par la probabilité de la solution, forme donnée a

priori à la densité de probabilité de la solution. Ce second terme peut constituer l'aspect régularisant du problème inverse : en prenant une densité de probabilité gaussienne centrée sur 0, on donne a priori plus de crédit à une solution proche de 0, c'est à dire une solution de moindre énergie. L'approche bayésienne a été appliquée récemment à la problématique d'imagerie acoustique¹⁰ et une étude réalisée par Antonio Pereira [C24] au cours de sa thèse [T3] a permis de mettre en évidence le fait que la méthode d'imagerie sous déterminée proposée en section 3.3.1 était un cas particulier de l'approche bayésienne, et que le mécanisme de régularisation intrinsèque à cette dernière semblait plus performant que la méthode de la courbe en L.

Les approches probabilistes, plus souples et potentiellement plus performantes que les méthodes classiques, constituent un potentiel important pour l'amélioration des méthodes d'identification actuelles.

Les principales méthodes d'imagerie acoustique partent généralement de l'hypothèse que la source étudiée est la seule source de bruit en présence et qu'elle rayonne dans un milieu infini. C'est faux dans la plupart des cas, mais cela se justifie par le fait que le champ proche d'une source est dominé par le champ direct. Cela devient de moins en moins justifié lorsqu'on éloigne la mesure de la source.

L'holographie acoustique conventionnelle, par exemple, fait l'hypothèse que les ondes acoustiques ne proviennent que d'un côté du plan de mesure. Il existe des approches du type mesure double information (deux plans de mesure de pression, ou un plan dans lequel on mesure à la fois pression et vitesse) qui permettent de séparer ce qui provient des deux côtés de l'antenne. L'utilisation d'une antenne de sondes pressions vitesses fait l'objet d'une collaboration avec la DTU (Technical University of Denmark), et une méthode d'imagerie avec séparation des sources des deux côtés de l'antenne a été mise au point. La prise en compte de la double information pression vitesse reste cependant un sujet d'étude dans le cadre de la poursuite de cette collaboration.

La méthode PTF (Patch Transfer Functions) inverse, développée au LVA¹¹, utilise également l'antennerie double couche, mais l'objectif est encore plus ambitieux : il s'agit de remonter aux vitesses vibratoires de la source à partir d'une mesure pression vitesse sur une surface entourant complètement l'objet étudié. Les impédances sont calculées à partir d'un modèle élément fini de la cavité virtuelle créée par la surface de mesure et la surface source. Le déconfinement obtenu par une telle approche est théoriquement complet, on s'affranchit à la fois des sources perturbatrices et de la réverbération du local, ce qui en fait une approche intéressante pour les applications industrielles. La méthode n'en est cependant pas encore à ce stade, plusieurs difficultés restent à surmonter, telles que la nécessité d'avoir une surface de mesure de grande taille nécessitant de multiplier les passes de mesure, et donc de pouvoir faire fonctionner la source dans un état strictement stabilisé. Ces limites ont été mises en évidence à l'occasion du projet ISIS [E4], dont un

10. J. Antoni. A Bayesian approach to sound source reconstruction : Optimal basis, regularization, and focusing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 131(4) :2873–2890, 2012.

11. M. Aucejo, N. Totaro, J.-L. Guyader. Identification of source velocities on 3D structures in non-anechoic environments : Theoretical background and experimental validation of the inverse patch transfer functions method. *Journal of Sound and Vibration*, 329 :3691–3708, 2010.

des objectifs était d'appliquer la méthode PTF inverse à une boîte de vitesse automobile. Des développements peuvent également être envisagés concernant l'aspect régularisation, avec la possibilité d'employer une approche bayésienne, ou concernant l'estimation des impédances, basées pour l'instant sur l'étude d'une cavité virtuelle, ce qui conduit à des singularités bien réelles à des fréquences propres d'une cavité pourtant inexistante.

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, la nécessité de mesurer le champ acoustique sur des surfaces étendues nécessite en pratique l'utilisation de mesures séquentielles, pendant lesquelles une antenne de capteurs est déplacée. Cela implique de pouvoir synchroniser les différentes passes de mesure, en utilisant un certain nombre de capteurs de référence ou en recouvrant partiellement les différentes passes d'acquisition. Dans les deux cas, on est confronté au problème que de nombreuses voies ne sont pas acquises simultanément, de nombreux interspectres ne sont par conséquent pas estimés. Ce problème peut être contourné de manière classique par analyse spectrale (cf. section 1.1.3 de ce mémoire), mais peut également être abordée par des approches de complétion de données. C'est l'objet de la thèse de Yu Liang [T5], qui étudie les différentes possibilités de remplir les matrices interspectrales partielles issues de mesures séquentielles. De nombreuses pistes de développement de ce sujet sont en relation avec les problématiques de compressive sensing et avec le principe de parcimonie¹².

Les sources acoustiques d'origine aérodynamiques constituent une problématique particulière en imagerie acoustique, à cause des mécanismes complexes de génération du bruit (écoulements turbulents) et à cause des sources tournantes (typiquement les pales d'un ventilateur). L'objectif du projet SEMAFOR [E2], qui doit démarrer en 2013, est d'adapter la démarche d'imagerie acoustique à ce type de source, en couplant l'imagerie acoustique à des outils de traitement du signal basés sur l'analyse spectrale multi-voies et la cyclostationnarité.

La réfractovibrométrie, abordée dans la section 3.1.1 de ce rapport, est une approche extrêmement intéressante car elle constitue une mesure totalement non intrusive d'un champ de pression acoustique, contrairement à un microphone classique qui peut perturber localement le champ. De nombreuses applications potentielles concernent l'étude acoustique de micro-cavités, ou encore la caractérisation d'un champ acoustique au voisinage d'un matériau particulier. Une thèse, financée par le labex CeLyA (Centre Lyonnais d'Acoustique), va démarrer d'ici fin 2012 en partenariat avec le DGCB (ENTPE). L'objectif est l'optimisation de la géométrie des matériaux acoustiques, par effet de localisation acoustique par irrégularités de surface ou géométries fractales¹³. La réfractovibrométrie semble être un outil particulièrement adapté à l'étude de ce type de phénomènes.

Les développements récents proposés pour la méthode RIFF dans l'article [P14] (cf.

12. E.J. Candès, T. Tao. Reflections on compressed sensing. *IEEE Information Theory Society Newsletter*, 58(4) :20-23, 2008

13. B. Sapoval, S. Felix, M. Filoche. Localisation and damping in resonators with complex geometry. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 161 :225-232, 2008.

section 2.3 de ce mémoire) permettent d'envisager un certain nombre d'applications, notamment dans le cadre d'identification de paramètres de la structure étudiée. Les corrections apportées au schéma RIFF sont en effet dépendantes des paramètres de la structure (masse, raideur), et sont très sensibles au désaccord entre paramètres utilisés et paramètres réels. Un objectif à court terme est de poursuivre la collaboration avec le LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université de Maine) sur cette thématique.

L'étude des systèmes de transmissibilités, abordée en collaboration avec l'université de Delft (Pays-Bas) dans le cadre de l'étude des méthodes d'analyse opérationnelles de voies de transfert (OPA, cf. section 2.2 de ce mémoire), semble être un sujet porteur sur différents aspects. On peut tout d'abord poursuivre l'étude de la méthode OPA, qui possède un certain nombre d'inconvénients majeurs qui en font une méthode encore peu fiable à l'heure actuelle. Des voies d'amélioration se situeraient dans l'utilisation de combinaisons particulières de capteurs pour l'établissement des signaux représentatifs des voies de passage, ou encore dans la prise en compte des voies de passage aériennes. Les systèmes de transmissibilités, lorsqu'ils sont correctement dimensionnés, sont en principe insensibles aux variations de conditions de fonctionnement de la source. Cette propriété pourrait être utilisée à des fins de surveillance de l'état de santé de la machine instrumentée, une déviation du système (aisément mesurée) pouvant être symptomatique d'un fonctionnement anormal ou d'un endommagement.

La collaboration du LVA avec le CEA LETI, entamée en 2010 par le stage de master puis la thèse de Rémy Dejaeger [DEA5, T4], a débouché en 2012 sur le démarrage de deux projets MADNEMS et SONAT [E3] respectivement sur l'étude des microphones et hauts parleurs MEMS. Le projet SONAT a pour but le développement de prototypes de hauts parleurs digitaux basés sur la réalisation de matrices de micro haut-parleurs (appelés speaklets) de quelques centaines de micromètres de diamètre. Le principe des hauts parleurs digitaux est étudié dans le projet SONAT pour des applications en réalisation d'enceintes acoustiques, mais de nombreuses autres applications sont envisageables. La matrice de speaklets peut être utilisée de manière à créer des hauts parleurs hyperdirectifs, en utilisant le principe des hauts parleurs digitaux qui est de recomposer un son à partir de trains d'impulsions générés par les différents speaklets. Un post-doctorant arrive au LVA en décembre 2012, et travaillera sur le concept de haut parleur digital et sur la réalisation d'une maquette macroscopique.

Pour finir, l'étude des sources vibro-acoustiques que constituent les machines tournantes reste une problématique complexe, nécessitant l'application d'outils basés sur la cyclostationnarité. De nombreux développements sont envisageables sur cette thématique, en particulier sur l'utilisation des codeurs angulaires permettant de mesurer la vitesse de rotation instantanée. De nombreuses informations sur la source sont en effet portées par la vitesse instantanée, dont l'extraction et l'interprétation restent des sujets de recherche actuels. L'exploitation de la cyclostationnarité floue (cf. section 1.2.2) notamment, est un aspect encore très peu abordé dans la littérature, et laisse entrevoir un réel potentiel en diagnostic.

Liste des partenaires académiques et industriels

Partenaires académiques

- Delft University of Technology, Delft, Netherlands [C25, C27, C28, C30]
- Technical Univeristy of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark [P13]
- LAUM (Université du Maine) [P10, P14, C15]
- LAM/ IJLRd'A (Université Paris VI - Pierre et Marie Curie) [P10, CN9]
- Centre Acoustique du LMFA (LMFA, Ecole Centrale Lyon) [CN8, R7, E2]
- LAMCOS (INSA Lyon) [C35, C36, E4]
- LTDS (Ecole Centrale Lyon) [C35, C36, E4]
- CEA LETI, Grenoble [DEA5, T4, CN10, C31, E3]

Partenaires industriels

- Renault (Direction de la mécanique), Rueil Malmaison [P1, P2, P3, PN2, R1, R2, R5]
- Renault Trucks, Vénissieux [C9, R3, R4, PFE3, PFE5]
- Irisbus-Iveco, Vénissieux [PFE6, C16, E1]
- PSA Peugeot-Citroën, DRIA, Vélizy-Villacoublay [E5, R6, P8]
- MicrodB, Vibratex, Ecully [C14, C34, C33, E1, E2]
- 01dB Metravib, Limonest [R4]
- CETIM, Senlis [PFE2, DEA2]
- CETIAT, Villeurbanne [DEA1]
- FOCAL JMLAB, Saint-Etienne [E3]

Bibliographie

Mémoire de DEA & Thèse de doctorat

- [M1] Q. Leclère. Identification des efforts appliqués aux paliers vilebrequin d'un carter cylindre de GMP par problème inverse. *Rapport de DEA, LVA, INSA-Lyon*, 2000.
- [M2] Q. Leclère. Etude et développement de la mesure indirecte d'efforts - Application à l'identification des sources internes d'un moteur Diesel. *Thèse de doctorat, LVA, INSA-Lyon*, 2003.

Publications dans des revues internationales avec comité de lecture

- [P1] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Different least squares approaches to identify dynamic forces acting on an engine cylinder block. *Acta Acustica*, 90 : p.285-292, 2004.
- [P2] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Application of multi-channel spectral analysis to identify the source of a noise amplitude modulation in a diesel engine operating at idle. *Applied Acoustics*, 66 : p.779-798, 2005.
- [P3] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Indirect measurement of main bearing loads in an operating diesel engine. *Journal of Sound and Vibration*, 286 : p.341-361, 2005.
- [P4] Q. Leclère et B. Laulagnet. Particle velocity field measurement using an ultra-light membrane. *Applied Acoustics*, 69 : p.302-310, 2008.
- [P5] Q. Leclère. Acoustic imaging using under-determined inverse approaches : Frequency limitations and optimal regularization. *Journal of Sound and Vibration*, 321 : p.605-619, 2009.
- [P6] Q. Leclère. Multi-Channel Spectral Analysis of Multi-Pass Acquisition Measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 : p.1415-1422, 2009.
- [P7] Q. Leclère et B. Laulagnet. Nearfield acoustic holography using a laser vibrometer and a light membrane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3) : p.1245-1249, 2009.
- [P8] C. Pézerat, Q. Leclère, N. Totaro et M. Pachebat. Identification of vibration excitations from acoustic measurements using Near Field Acoustic Holography (NAH) and the Force Analysis Technique (FAT). *Journal of Sound and Vibration*, 326 : p.540-556, 2009.

- [P9] L. Pruvost, Q. Leclère et E. Parizet. Diesel engine combustion and mechanical noise separation using an improved spectrofilter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 : p.2072-2087, 2009.
- [P10] J.-L. Le Carrou, Q. Leclère et F. Gautier. Some characteristics of the concert harp's acoustic radiation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 127(5) : p.3203-3211, 2010.
- [P11] Q. Leclère, L. Pruvost et E. Parizet. Angular and temporal determinism of rotating machine signals : The diesel engine case. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 : p.2012-2020, 2010. (*Special Issue : ISMA 2010*).
- [P12] A. A. Pereira et Q. Leclère. Assessment of acoustic pressure holograms from membrane velocity measurements. *Applied Acoustics*, 71 : p.583-585, 2010. (*Technical note*).
- [P13] E. Fernandez-Grande, F. Jacobsen et Q. Leclère. Direct formulation of the supersonic acoustic intensity in space domain. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1) : p.186-193, 2012.
- [P14] Q. Leclère et C. Pézerat. Vibration source identification using corrected finite difference schemes. *Journal of Sound and Vibration*, 331 : p.1366-1377, 2012.
- [P15] E. Fernandez-Grande, F. Jacobsen et Q. Leclère. Sound field separation with sound pressure and particle velocity measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(6) : p.3818-3825, 2012.

Publications dans des revues nationales avec comité de lecture

- [PN1] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Reconstitution de forces dynamiques stationnaires excitant un carter cylindre de moteur. *Acoustique et Techniques*, 31 : p.16-20, 2002. *Extrait des actes du congrès "Sources vibratoires et acoustiques dans les transports routiers", Guyancourt, France, 2002.*
- [PN2] Q. Leclère, L. Polac, B. Laulagnet et J.-L. Guyader. Vibro-acoustique des moteurs d'automobiles. *Techniques de l'Ingénieur*, BM 2773, 2006.
- [PN3] Q. Leclère, C. Sandier, B. Laulagnet et L. Polac. Identification de sources acoustiques sur un moteur essence par méthodes de cohérences. *Acoustique et Techniques*, 50 : p.21-25, 2007. *Extrait des actes du 18ième Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France, 2007.*

Communications en congrès international avec actes

- [C1] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Reconstitution of stationary forces exciting an engine cylinder block. Dans *proceedings of Inter-Noise 2002*, Dearborn, MI, USA, 2002.
- [C2] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Different least squares approaches to solve indirect force measurement problems. Dans *proceedings of Euro-Noise 2003*, Naples, Italy, 2003.

- [C3] L. Sanchez, Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Inverse problem application in the engine vibro-acoustical domain. Dans *Proceedings of Euronoise 2003*, Naples, Italy, 2003.
- [C4] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Multi-channel analysis of complex vibro-acoustic sources. Dans *proceedings of inter-noise 2004*, Prague, Czech Rep., 2004.
- [C5] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Application of indirect measurement techniques to an operating Diesel engine. Dans *proceedings of ISMA 2004*, Leuven, Belgium, 2004.
- [C6] Q. Leclère et B. Laulagnet. An alternative acoustic imaging technique to improve capabilities of microphone array measurements. Dans *Proceedings of NOVEM 2005*, Saint Raphael, France, 2005.
- [C7] Q. Leclère, B. Laulagnet et L. Polac. Application of an innovative acoustic imaging technique to assess acoustic power maps of a gasoline engine. Dans *proceedings of Forum Acusticum 2005*, Budapest, Hungary, 2005.
- [C8] Q. Leclère. Acoustic imaging of complex sources with limited measurement capabilities. Dans *Proceedings of Euronoise 2006*, Tampere, Finland, 2006.
- [C9] F. Pichot, S. Charreton, Q. Leclère et C. Berail. NVH simulation of heavy duty engines. Dans *Proceedings of Diesel Engine 2006*, Lyon, France, 2006.
- [C10] L. Pruvost, Q. Leclère et E. Parizet. Diesel combustion noise extraction using Wiener filtering - Optimisation and validation of the method. Dans *Proceedings of SIA's Automobile Comfort Conference*, Le Mans, France, 2006.
- [C11] Q. Leclère et B. Laulagnet. Imaging the acoustic field scanning an ultra light membrane using laser vibrometry. Dans *proceedings of Inter Noise 2007*, Istambul, Turkey, 2007.
- [C12] G. Pavic et Q. Leclère. Moment excitation : an old problem revisited. Dans *proceedings of Inter Noise 2007*, Istambul, Turkey, 2007.
- [C13] L. Pruvost, Q. Leclère et E. Parizet. Improvement of the spectrofilter - Separation of coherent sources overlapping in time and frequency domains. Dans *Proceedings of ICA*, Madrid, Espagne, 2007.
- [C14] L. Lamotte et Q. Leclère. Improving the localisation of sources based on shaped arrays with a reduced number of microphones. Dans *proceedings of Acoustics08*, Paris, France, 2008.
- [C15] Q. Leclère, J.-L. Le Carrou et F. Gautier. Study of a concert harp's radiation using acoustic imaging methods. Dans *proceedings of Acoustics08*, Paris, France, 2008.
- [C16] Q. Leclère, G. Pavic, L. Bleanonu et S. Greffe. Quantification of airborne and structure borne engine noise in a coach under real operating conditions. Dans *proceedings of ISMA 2008*, Leuven, Belgium, 2008.
- [C17] Q. Leclère et C. Pézerat. Time domain identification of loads on plate-like structures using an array of acoustic velocity sensors. Dans *proceedings of Acoustics08*, Paris, France, 2008.

- [C18] L. Pruvost, Q. Leclère et E. Parizet. Improved spectrofilter applied to diesel engine noise : combustion and mechanical noise separation. Dans *Proceedings of Acoustics08*, Paris, France, 2008.
- [C19] Q. Leclère, L. Pruvost et E. Parizet. Angular and temporal determinism of rotating machine signals : the diesel engine case. Dans *proceedings of ISMA 2010*, Leuven, Belgium, 2010.
- [C20] J. Drouet, Q. Leclère et E. Parizet. Experimental modeling of Wiener filters estimated on an operating diesel engine. Dans *Proceedings of Surveillance 6*, Compiègne, France, 2011.
- [C21] Q. Leclère, J. Drouet et E. Parizet. Extraction and analysis of diesel engine combustion noise. Dans *Proceedings of exploratory workshop on modern methods of vibro-acoustic study with application to automotive*, Pitesti, Romania, 2011.
- [C22] Q. Leclère et N. Hamzaoui. Using the moving synchronous average to analyse fuzzy cyclostationary signals. Dans *Proceedings of Surveillance 6*, Compiègne, France, 2011.
- [C23] A. A. Pereira et Q. Leclère. Improving the equivalent source method for noise source identification in enclosed spaces. Dans *proceedings of ICSV 18*, Rio de Janeiro, Brazil, 2011.
- [C24] A. A. Pereira, Q. Leclère et J. Antoni. A theoretical and experimental comparison of the equivalent source method and a bayesian approach to noise source identification. Dans *proceedings of BEBEC 2012*, Berlin, Germany, 2012.
- [C25] N. B. Roozen, Q. Leclère et C. Sandier. Operational transfer path analysis applied to a small gearbox test set-up. Dans *proceedings of Acoustics 2012*, Nantes, France, 2012.
- [C26] J. Drouet, Q. Leclère et E. Parizet. Perceptual evaluation of the influence of the estimation of Wiener filters applied to engine noise. Dans *proceedings of Acoustics 2012*, Nantes, France, 2012.
- [C27] C. Sandier, Q. Leclère et N. B. Roozen. Operational transfer path analysis : theoretical aspects and experimental validation. Dans *proceedings of Acoustics 2012*, Nantes, France, 2012.
- [C28] Q. Leclère, N.B. Roozen, et C. Sandier. Experimental estimation of transmissibility matrices. Dans *proceedings of ISMA 2012*, Leuven, Belgium, 2012.
- [C29] Q. Leclère et C. Sandier. Application of the transmissibility concept to acoustic array measurements. Dans *proceedings of Inter Noise 2012*, New York, USA, 2012.
- [C30] N. B. Roozen et Q. Leclère. Operational Transfer Path Analysis, some practical aspects. Dans *proceedings of Inter Noise 2012*, New York, USA, 2012.
- [C31] R. Dejaeger, F. Casset, B. Desloges, G. Le Rhun, P. Robert, S. Fanget, Q. Leclère, K. Ege, et J.-L. Guyader. Development and Characterization of a Piezoelectrically Actuated MEMS Digital Loudspeaker. Dans *proceedings Eurosenors XXVI*, Kraków, Poland, 2012.
- [C32] J. Drouet, Q. Leclère et E. Parizet. Noise source separation in diesel engines : application to acoustic listening tests. Dans *proceedings of ISMA 2012*, Leuven, Belgium, 2012.

- [C33] A. A. Pereira, Q. Leclère, L. Lamotte, S. Paillasseur, et L. Bleandonu. Noise source identification in a vehicle cabin using an iterative weighted approach to the ESM method. Dans *proceedings of ISMA 2012*, Leuven, Belgium, 2012.
- [C34] L. Lamotte, Q. Leclère. Interpreting sound emission of diesel engine separating combustion and mechanical noise sources. Dans *proceedings of the 7th Automotive and Railroad Comfort*, Le Mans, France, 2012.
- [C35] N. Totaro, C. Sandier, Q. Leclere, D. Remond, M. Boucaud, J. Perret-Liaudet. Source identification on a reduction gearbox using acoustical measurements in a non-anechoic environment. Dans *proceedings of the 19th International Congress on Sound and Vibration*, , Vilnius, Lithuania, 2012.
- [C36] M. Boucaud, C. Sandier, N. Totaro, Q. Leclere, D. Remond, J. Perret-Liaudet. Improved acoustical sources location in gear power transmissions. Dans *proceedings of the 18th Symposium Vibrations, Shocks and Noise*, Clamart, France, 2012.

Communications en congrès national avec actes

- [CN1] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Identification des efforts appliqués aux paliers vilebrequin d'un carter cylindre de GMP par problème inverse. Dans *Confort Automobile et ferroviaire, recueil de conférences*, Le Mans, FRANCE, 2000.
- [CN2] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Reconstitution de forces dynamiques stationnaires excitant un carter cylindre de moteur. Dans *Sources vibratoires et acoustiques dans les transports routiers, recueil de conférences*, Guyancourt, France, 2002.
- [CN3] C. Onescu et Q. Leclère. Calcul de la reponse dynamique de l'ensemble carter moteur-culasse a l'excitation de forces verticales. Dans *Buletinul Univ. din Pitesti, vol 3(9). Volum consacrat lucrurilor CNMS-XXVII*, Pitesti, Romania, 2003.
- [CN4] Q. Leclère, C. Pézerat, B. Laulagnet et L. Polac. Mise en évidence du rôle du circuit d'injection dans la modulation d'amplitude du bruit généré par un moteur Diesel au ralenti. Dans *Actes du Congrès Confort Automobile et Ferroviaire*, Le Mans, France, 2004.
- [CN5] Q. Leclère, B. Laulagnet et L. Polac. Imagerie acoustique par projection en sources principales. Dans *Journée SFA : Méthodes expérimentales en acoustique des transports*, Guyancourt, FRANCE, 2005.
- [CN6] Q. Leclère, C. Sandier, B. Laulagnet et L. Polac. Identification de sources acoustiques sur un moteur essence par méthodes de cohérences. Dans *Actes du 18ième Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, FRANCE, 2007.
- [CN7] L. Pruvost, Q. Leclère et E. Parizet. Spectrofiltre adapté à la séparation de sources cohérentes et entrelacées dans le plan temps-fréquences. Dans *Actes du 18ième Congrès Français de Mécanique*, Grenoble, FRANCE, 2007.
- [CN8] F. Chevillotte, Q. Leclère, N. Totaro, C. Pézerat, P. Souchotte et G. Robert. Identification d'un champ de pression pariétale induit par un écoulement turbulent à partir

de mesures vibratoires. Dans *Actes du 10ième Congrès Français d'Acoustique*, Lyon, France, 2010.

[CN9] Q. Leclère, J.-L. Le Carrou et P.-A. Roiron. Caractérisation expérimentale de la réponse d'une corde vibrante sollicitée par un plectre. Dans *Actes du 20ième Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, 2011.

[CN10] R. Dejaeger, G. Jourdana, K. Ege, Q. Leclère, S. Fanget, J.-L. Guyader et P. Robert. Le haut-parleur digital, modélisation et réalisation expérimentale. Dans *Actes du 20ième Congrès Français de Mécanique*, Besançon, France, 2011.

Séminaires

[S1] Q. Leclère. Imagerie acoustique par projection en sources principales. *Séminaire du Laum*, Le Mans, France, 2005.

[S2] Q. Leclère. Identification de sources sur moteur Diesel par analyse spectrale multi-voies. *Journée française de la Vibro acoustique*, Lyon, France, 2005.

[S3] Q. Leclère. Comparaison qualitative et quantitative de méthodes d'imagerie acoustique, application au moteur Diesel Renault F9Q. *Journée INRETS imagerie acoustique*, Lyon, France, 2008.

[S4] Q. Leclère ; C. Sandier ; B. Laulagnet et L. Polac. Identification de sources acoustiques sur un moteur essence par méthodes de cohérences. *Journée Française de la vibro-acoustique*, Lyon, France, 2008.

[S5] Q. Leclère et A. A Pereira. Imagerie acoustique par sources équivalentes. Aspects pratiques de la régularisation. *Journé IMAT*, Massy, France, 2010.

[S6] Q. Leclère. Dualité temps/angle du déterminisme des signaux de machines tournantes, analyse expérimentale de signaux à cyclostationnarité floue. *Journée approches angulaires*, Paris, France, 2011.

Thèses coencadrées

[T1] L. Pruvost. Extraction du bruit de combustion d'un moteur Diesel. Développement et application d'un spectrofiltre. *LVA, INSA-Lyon*, soutenue le 10 juillet 2009. Taux d'encadrement 50% (Directeur E. Parizet)

[T2] J. Drouet. Etude perceptive du bruit de combustion. *LVA, INSA-Lyon*, soutenance prévue en 2013. Taux d'encadrement 50% (Directeur E. Parizet)

[T3] A. A. Pereira. Imagerie acoustique dans les espaces clos. *LVA, INSA-Lyon*, soutenance prévue en 2013. Taux d'encadrement 50% (Directeur B. Laulagnet)

[T4] R. Dejaeger. Etude des hauts parleurs digitaux MEMS. *CEA LETI, LVA, INSA-Lyon*, soutenance prévue fin 2013. Directeur J.-L. Guyader

[T5] Y. Liang. Complétion de données appliquée à l'antennerie acoustique. *LVA, INSA-Lyon*, soutenance prévue en 2015. Directeur J. Antoni

Rapports de stages et projets de fin d'études encadrés

- [PFE1] P. Brouillac et B. Veyron. Banc vibro-acoustique Moteur Renault 1.9dCi. *LVA, INSA-Lyon*, 2002.
- [PFE2] G. Pouvillon et J. Fromell. Analyse vibro-acoustique d'une tondeuse à gazon par les méthodes de cohérences. *LVA, INSA-Lyon*, 2005.
- [PFE3] N. Duvernay. Modélisation du couplage vilebrequin-palier dans un moteur thermique. *LVA, INSA-Lyon*, 2006.
- [PFE4] Q. Menassanch et F. Cesano. Imagerie acoustique par visée laser d'une membrane tendue. Application sources acoustiques moteur. *LVA, INSA-Lyon*, 2006.
- [PFE5] C. De Araujo. Caractérisation des efforts internes d'un moteur diesel. *LVA, INSA-Lyon*, 2006.
- [PFE6] N. Hory et S. Andre. Caractérisation du bruit solidien à l'intérieur d'un autocar. *LVA, INSA-Lyon*, 2007.
- [PFE7] A. A. Pereira. Image du champ acoustique à partir de la visée Laser d'une membrane ultra légère. *LVA, INSA-Lyon*, 2009.
- [PFE8] G. Etienne. Validation expérimentale d'une méthode d'identification acoustique. *LVA, INSA-Lyon*, 2010.
- [PFE9] N. Hainque et C. Mazzoleni. Etude de la déformation contrôlée d'un manche de guitare. *LVA, INSA-Lyon*, 2010.

Rapports de stages de DEA (master recherche) encadrés

- [DEA1] F. Denard. Etude vibro-acoustique d'une machine frigorifique par intercorrélations. *LVA, INSA-Lyon*, 2004.
- [DEA2] P. Zvegintzoff. Mise en place d'une méthode hybride de caractérisation du rayonnement acoustique sur un silencieux d'échappement. *LVA, INSA-Lyon*, 2005.
- [DEA3] Z. Zhou. Acoustic particle velocity measurement by ultra-light membrane and its applications in acoustic holography. *LVA, INSA-Lyon*, 2007.
- [DEA4] X. Thomas. Rayonnement Acoustique d'un Collecteur d'Admission de Moteur Essence. *LVA, INSA-Lyon*, 2008.
- [DEA5] R. Dejaeger. Le haut parleur digital : étude d'un nouveau concept de transduction sonore. *LVA, INSA-Lyon*, 2010.
- [DEA6] S. Tanguy. Mesure optique de la pression acoustique dans une cavité fractale. *LVA, INSA-Lyon*, 2011.
- [DEA7] F. Mbailassem. Utilisation de l'imagerie acoustique pour la détection des défauts sur les machines tournantes : cas de la formation de voies. *LVA, INSA-Lyon*, 2012.

Rapports de projets et d'études contractuelles

- [R1] Q. Leclère. Rapport d'étude Renault : étude de la modulation du niveau de bruit du moteur F9Q au ralenti. *LVA, INSA-Lyon*, 2004.

- [R2] Q. Leclère. Rapport d'étude Renault : Caractérisation du rayonnement du moteur K4M790 et d'évaluation de solutions d'améliorations. *LVA, INSA-Lyon*, 2005.
- [R3] Q. Leclère. Rapport d'étude Renault Trucks : Caractérisation des efforts en fonctionnement du moteur VOLVO 6 cylindres MD11. *LVA, INSA-Lyon*, 2005.
- [R4] B. Laulagnet, Q. Leclere, F. Pichot, R. Tilagone et G. Sabatié. Rapport final du Projet PREDIT pré-CONNAISSAMCES. *LVA INSA, Renault Trucks, IFP, 01dB-Metravib*, 2007.
- [R5] Q. Leclère. Rapport d'études Renault : Identification de sources acoustiques sur moteur K4M par méthodes statistiques. *LVA, INSA-Lyon*, 2007.
- [R6] C. Pézerat, N. Totaro et Q. Leclère. Rapport d'étude PSA : Mesures indirectes d'efforts par la méthode RIFF à partir de mesures acoustiques par sonde P-U Microflown. Utilisation d'outils de rétropropagation. *LVA, INSA-Lyon*, 2007.
- [R7] G. Robert (coordinateur). Rapport Final du projet Carnot IP² : Identification d'un champ de Pression Pariétale. *LVA, INSA-Lyon, LMFA, EC Lyon*, 2010.

Projets et contrats en cours

- [E1] ACOUBUS : Moyen d'imagerie pour la mise au point acoustique des véhicules industriels - Application aux bus hybrides. Partenaires : MicrodB, Irisbus, Vibratec, LVA. *financement ADEME*, 2010-2013.
- [E2] SEMAFOR : inverSE Method for the characterization of Aeroacoustic sources generated by turboFan rotOR. Partenaires : SNECMA, MicrodB, LMFA, LVA. *financement FNRAE*, 2013-2015.
- [E3] SONAT : Speakers based ON Advanced Technology. Partenaires : Focal JMLab, CEA LETI, EASII IC, LVA. *financement FUI*, 2012-2015.
- [E4] ISIS : Identification des Sources Internes d'un Système de transmission par engrenages par mesures acoustiques. Partenaires : LTDS, LAMCOS, LVA. *financement Carnot I@L*, 2011-2012.
- [E5] Etude vibratoire d'un moteur DW10B en fonctionnement. *contrat PSA*, 2012.