

# JJCAB 2016

Journées Jeunes Chercheurs en vibrations, Acoustique et Bruit

17-18 novembre 2016

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille



Bienvenue à tous au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, pour la 6<sup>ème</sup> édition des Journées Jeunes Chercheurs en vibrations, Acoustique et Bruit !

Un grand merci à nos partenaires :

- le Labex Mécanique et Complexité
  - Genesis
  - DCNS Research
  - le Centre de Transfert de Technologie du Mans
  - l'Association Française de Mécanique / Adyva
  - les membres du Groupe Vibrations et Bruit (GVB) de la Société Française d'Acoustique (SFA)
  - la fédération Fabri de Peiresc
  - l'École Doctorale 353 - Sciences pour l'ingénieur : Mécanique, Physique, Micro et Nanoélectronique
  - le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
- aux deux conférenciers, François Reynard (DCNS Group) et Christophe Vergez (LMA),  
et à Samira Mohamady venue présenter le Young Acousticians Network.

L'équipe d'organisation des JJCAB

# Sommaire

PLANNING	9
INFORMATIONS PRATIQUES	10
CONFÉRENCE - PHYSIQUE DES INSTRUMENTS DE MUSIQUE : DES VIBRATIONS, DE L'ACOUSTIQUE ET DU BRUIT... MAIS POUR LE PLAISIR !	12
<i>Christophe Vergez - LMA</i>	
1 SESSION 1	13
1.1 Modélisation du comportement vibroacoustique des induc- tances de type sec du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)	13
<i>Paul Gning - UTC</i>	
1.2 Vers une caractérisation robuste du comportement vibratoire d'une structure boulonnée en présence de paramètres incertains	14
<i>Martin Ghienne - LMSSC</i>	
1.3 Surveillance vibratoire d'une transmission de puissance à en- grenages planétaires . . . . .	16
<i>Elisa Hubert - SAFRAN Tech, LASPI</i>	
1.4 Couplage des méthodes Galerkin discontinue avec ondes planes et éléments finis pour l'acoustique . . . . .	17
<i>Mathieu Gaborit - LAUM, MWL</i>	
1.5 Étude expérimentale d'un absorbeur de bruit non linéaire actif	18
<i>Pierre-Yvon Bryk - LMA</i>	
1.6 Numerical modelling of impulse sound propagation . . . . .	19
<i>Matthias Cosnefroy - LMFA, ISL</i>	
1.7 Filtrage adapté stochastique appliqué à la détection de plongeurs	20
<i>Léa Bouffaut - IRENav</i>	

1.8	Résonateur de Helmholtz à volume variable à base d'EAP pour le contrôle vibro-acoustique . . . . .	21
	<i>Ahmed Abbad - FEMTO-ST, GAUS</i>	
1.9	Reconception d'un viscoanalyseur pour la caractérisation haute fréquence de matériaux viscoélastiques . . . . .	22
	<i>Adrien Chassaigne - LISMMA</i>	
1.10	Modélisation multi-échelle des propriétés de transport et acoustiques de matériaux fibreux . . . . .	22
	<i>Hoang Tuan Luu - MSME, GAUS</i>	
1.11	Approches probabilistes pour l'analyse des performances vibro-acoustiques d'un véhicule . . . . .	23
	<i>Gianluigi Brogna - LVA</i>	
1.12	Méthodes numériques performantes pour le calcul des vibrations auto-entretenues dans les problèmes de crissement au freinage . . . . .	25
	<i>Lucien Charroyer - LAE, LTDS, CeLyA</i>	
1.13	Propriétés acoustiques de matériaux perforés comprenant des pores dead-end périodiques pour des applications basses fréquences . . . . .	26
	<i>Alexandre Lardeau - DRIVE</i>	
1.14	Développement d'outils d'aide à la conception pour luthiers .	27
	<i>Romain Viala - FEMTO-ST</i>	
1.15	Caractérisation de sources vibratoires par méthode inverse et régularisation Bayésienne . . . . .	28
	<i>Charly Faure - LAUM</i>	

<b>PRESENTATION OF THE YOUNG ACOUSTICIANS NETWORK</b>		<b>30</b>
	<i>Samira Mohamady - RWTH, Aachen University</i>	

2	SESSION 2	31
2.1	Modélisation des vibrations générées par des écoulements en conduit . . . . .	31
	<i>Florian Hugues - UTC</i>	
2.2	Modélisation éléments finis non-linéaire de réservoirs élastiques soumis à une charge suiveuse pour le calcul des vibrations hydroélastiques . . . . .	32
	<i>Christophe Hoareau - LMSSC</i>	
2.3	Localisation in the piano soundboard . . . . .	33
	<i>Gautier Lefebvre - LMS</i>	
2.4	Simulations numériques pour la caractérisation de sources acoustiques en tunnel hydrodynamique avec adaptation de modèle et réduction du bruit de couche limite . . . . .	34
	<i>Sylvain Amailland - LAUM</i>	
2.5	Compréhension des phénomènes générateurs de bruit acoustique dans les habitacles automobiles . . . . .	35
	<i>Justine Carpentier - LAUM</i>	
2.6	Étude et développement d'une architecture logicielle et matérielle pour la télécommunication ultrasonore dans les matériaux solides . . . . .	36
	<i>Borys Shchukin - ESEO, LAUM</i>	
2.7	Conception et validation expérimentale d'un métamatériau avec interface polymère hautement dissipative . . . . .	37
	<i>Kévin Billon - FEMTO-ST</i>	
2.8	Proposition d'un cadre pour la conception d'amortisseurs viscoélastiques . . . . .	39
	<i>Kévin Jaboviste - FEMTO-ST</i>	

2.9	Modélisation des liaisons dans les structures assemblées . . .	40
	<i>Marco Rosatello - QUARTZ</i>	
2.10	Caractérisation expérimentale d'absorbeurs linéaires et non li- néaires à basse fréquence et fort niveau . . . . .	41
	<i>Alice Chauvin - LMA</i>	
2.11	Mesure de vibration par vision 3D . . . . .	42
	<i>Thomas Durand-Texte - LAUM, L2G, CTTM</i>	
<b>CONFÉRENCE - ACOUSTIQUE ET APPLICATIONS NAVALES</b>		<b>44</b>
	<i>François Reynard - DCNS Group</i>	
<b>3</b>	<b>SESSION 3</b>	<b>45</b>
3.1	Identification de la pression pariétale turbulente dans les do- maines naval et aéronautique . . . . .	45
	<i>Océane Grosset - IRT Jules Verne, LAUM</i>	
3.2	Identification modale en temps réel d'une poutre encastree libre en vibration à l'aide de filtres de Kalman et de caméras rapides . . . . .	46
	<i>Adrien Goeller - QUARTZ</i>	
3.3	Caractérisation du rayonnement acoustique d'un haut-parleur monté sur une barre de son : comparaison entre mesures, mé- thode d'éléments finis de surface et modèle sphéroïdal analytique	47
	<i>Vincent Roggerone - LMS</i>	
3.4	Enabling road noise engineering methods to model complex objects . . . . .	48
	<i>Matthew Kamrath - CSTB</i>	
3.5	Continuation de solutions quasi-périodiques . . . . .	50
	<i>Pierre Vigué - LMA</i>	
3.6	Atténuation des vibrations dans des structures creuses par ajout de matériaux granulaires . . . . .	51
	<i>Antoine Sternberger - IRT Jules Verne, LAUM</i>	

3.7	Réduction du temps de calcul de l'analyse de sensibilité d'un système non linéaire . . . . .	52
	<i>Justine Larivière - FEMTO-ST</i>	
3.8	Analyse de sensibilité globale pour la prédiction du bruit de passage des véhicules automobiles . . . . .	53
	<i>Hichem Hamdad - Renault, LAUM, LAE</i>	
3.9	Étude de phénomènes d'instabilités à l'origine du crissement des courroies poly-V en atmosphère humide . . . . .	54
	<i>Simon Gatignol - Hutchinson SNC, LTDS</i>	
3.10	Influence des structures internes non-axisymétriques sur le comportement vibro-acoustique de coques raidies cylindriques immergées . . . . .	55
	<i>Valentin Meyer - DCNS Research, LVA</i>	
3.11	Synthèse d'un champ acoustique avec contraste spatial élevé .	57
	<i>Maryna Sanalatii - LAUM, LMA, CTTM</i>	
3.12	Séparation de sources acoustiques au passage d'un véhicule .	58
	<i>Rémi Cousson - LAE, INSA</i>	
3.13	Influence des conditions de contact sur le crissement de frein	60
	<i>Enora Denimal - LTDS, PSA</i>	
3.14	Contrôle passif avec un NES fortement non linéaire . . . . .	61
	<i>Volodymyr Iurasov - LMA</i>	
<b>4</b>	<b>SESSION 4</b>	<b>62</b>
4.1	Impact de la compression uni-axiale sur l'acoustique d'une couche poreuse . . . . .	62
	<i>Lei Lei - UTC</i>	
4.2	Conception de panneaux non résonants basés sur l'utilisation de réseaux périodiques de trous noirs acoustiques . . . . .	62
	<i>Omar Aklouche - IRT Jules Verne, LAUM</i>	

4.3	Evaluation des paramètres microstructuraux dominant le comportement vibratoire d'un carter d'huile en polymère à fibres courtes . . . . .	64
	<i>Medhi Zerrad - LVA, Renault</i>	
4.4	Etude expérimentale du comportement dynamique non-linéaire d'un assemblage . . . . .	65
	<i>Pauline Butaud - FEMTO-ST</i>	
4.5	Homogénéisation périodique de plaques raidies à résonances internes . . . . .	66
	<i>Pascal Fossat - LTDS, ENTPE</i>	
4.6	Caractérisation et modélisation des liaisons mécaniques dans les systèmes simple- et double-ossature du bâtiment . . . . .	67
	<i>Fabien Marchetti - LVA, Matelys</i>	
4.7	Contrôle actif/passif de salle anéchoïque . . . . .	68
	<i>Cédric Pinhede - LMA</i>	
4.8	Synthèse d'impédance acoustique distribuée . . . . .	69
	<i>Gaël Matten - FEMTO-ST</i>	
4.9	Optimisation d'un système de son 3D léger en salle d'écoute usuelle . . . . .	70
	<i>Adrien Vidal - Genesis, LMA</i>	
4.10	Accord non uniforme d'amortisseurs dynamiques multi-modaux pour treillis périodiques . . . . .	71
	<i>Leandro Rodrigues Cunha - FEMTO-ST</i>	
4.11	Modélisation physique et synthèse sonore d'une guitare brésilienne . . . . .	72
	<i>Guilherme Orelli Paiva - LAUM, FEM-UNICAMP</i>	
4.12	Détection, localisation et identification de sources acoustiques avec un capteur compact . . . . .	73
	<i>Aro Ramamonjy - LMSSC</i>	

		jeudi	vendredi	
			Café	8h
			Conférence plénière: François Reynard (DCNS)	8h15
			Présentation flash (session 3)	9h
10h	Ouverture de l'accueil		Posters (session 3) +Café	10h
11h	Visite du laboratoire		Présentation flash (session 4)	11h15
12h	Déjeuner		Posters (session 4)	12h
13h30	Mot de bienvenue		Déjeuner	13h
13h45	Conférence plénière: Christophe Vergez (LMA)		Remise des prix/Clôture	13h45
14h30	Présentation flash (session 1)			14h15
15h30	Posters (session 1) + Café			
16h45	Présentation YAN			
16h55	Présentation flash (session 2)			
17h45	Posters (session 2)			
18h45	Dépôt des affaires à l'auberge de jeunesse			
20h	Repas de gala			

# Informations pratiques

## Vous rendre à l'auberge de jeunesse

**Vertigo Hôtel.** Adresse : 38 rue Fort Notre Dame, 13007 Marseille

À la sortie du LMA, prendre le bus B3B (arrêt technopôle Château Gombert) jusqu'au terminus La Rose. Prendre le métro 1 direction La Fourragère descendre à l'arrêt Vieux Port. Ensuite, prendre la direction sud sur Quai des Belges vers la Rue Bailli de Suffren, continuer sur Quai de Rive Neuve et prendre à gauche sur Rue Fort Notre Dame (temps estimé 36 min).

## Vous rendre au restaurant

**Les Arcenaulx.** Adresse : 25 Cours d'Estienne d'Orves, 13001 Marseille

Prendre la direction ouest sur Cours Honoré d'Estienne d'Orves vers Rue de la Paix Marcel Paul, puis prendre à gauche sur Rue de la Paix Marcel Paul (prendre les escaliers) et prendre à gauche sur Rue Fort Notre Dame.

## Sortir du laboratoire

Au niveau du stand d'accueil, une clé bleue est accrochée à un poteau, il faut la présenter au lecteur de badge sur le poteau pour pouvoir sortir du bâtiment.



# Conférence - Physique des instruments de musique

## Des vibrations, de l'acoustique et du bruit... mais pour le plaisir !

Christophe Vergez est un chercheur CNRS qui travaille au Laboratoire de Mécanique et Acoustique sur la physique des instruments de musique.

Il est particulièrement intéressé par les aspects non linéaires du fonctionnement des instruments entretenus (cordes frottés et instruments à vent).

Le but de ses recherches est de mieux comprendre comment le son produit par un instrument de musique dépend des paramètres fixés par le facteur d'instrument à sa fabrication (géométrie, matériaux) et ceux contrôlés par le musicien en cours de jeu (doigtés, pression dans la bouche, vitesse d'archet, etc).

---

Le but de cet exposé est de donner un aperçu de recherches menées sur les instruments de musique à vent (clarinette, saxophone, trompette, flûte, orgue...).

Dans une première partie, les éléments essentiels à la compréhension de la production du son seront présentés. Puis le contrôle de l'instrument par le musicien sera abordé selon deux points de vue : en montrant d'abord quelques approches expérimentales permettant de mesurer l'évolution des paramètres contrôlés par le musicien en cours de jeu, en détaillant ensuite quelques méthodes d'analyse des modèles physiques du fonctionnement de ces instruments.

La conclusion insistera probablement sur le fait que nous n'aurons pas eu assez de temps pour parler de tous les sujets ci-dessus.

# 1 Session 1

## 1.1 Modélisation du comportement vibroacoustique des inductances de type sec du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)

P. Gning<sup>1,2</sup>, V. Lanfranchi<sup>2</sup>, N. Dauchez<sup>1</sup>

1. *Laboratoire Roberval, UTC, Compiègne*

2. *Laboratoire d'Électromécanique de Compiègne*

Face à l'évolution des normes et contraintes environnementales, des solutions de réduction du bruit généré par les appareils hautes tensions sont nécessaires. Parmi ces appareils, les transformateurs et les bobines d'inductance sont depuis toujours ceux qui génèrent le plus de bruit permanent. Les appareils hautes tensions de RTE sont des appareils électriques qui émettent des champs électromagnétiques en fonction de leur alimentation. Ces champs, en interaction avec les courants électriques, mettent en vibration les éléments structurels des appareils, devenant ainsi sources de bruit. Les travaux présentés ici sont financés par RTE en partenariat avec les laboratoires Roberval et LEC (Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne) de l'Université de Technologie de Compiègne.

Cette thèse porte, en particulier, sur la modélisation du comportement vibroacoustique d'origine électromagnétique des inductances de type sec de RTE en vue de la réduction du bruit d'origine électromagnétique qu'elles génèrent. Une inductance de type sec est souvent constituée de plusieurs bobines concentriques séparés par de l'air et des cales.

L'objectif est de développer des outils de modélisation numérique, pour mieux prédire le comportement vibroacoustique de l'inductance de type sec en partant de son alimentation jusqu'à sa réponse qui est due aux excitations électromagnétiques correspondant à des forces de Laplace dans notre cas. Pour ce faire, il faut constituer une chaîne de modélisation couplant l'électromagnétisme à la vibroacoustique.

Le modèle électromagnétique, réalisé grâce à FLUX (Altair) permet de déduire la distribution et les amplitudes des forces de Laplace qui s'appliquent sur la structure mécanique de l'inductance. Le modèle mécanique, quant à lui réalisé dans NASTRAN, permet de déterminer les modes propres de l'inductance qui permettront par la suite de calculer la réponse vibroacoustique dans le logiciel VaOne (ESI GROUP). Une des difficultés majeures est le couplage électromagnétique et vibroacoustique entre les bobines concentriques.

Ces différents modèles sont validés séparément à travers des essais réalisés, dans un premier temps, sur un prototype simple qui est une bobine normalement destinée à la fabrication de haut-parleur. Il s'agira par la suite de coupler ces modèles, de valider ce couplage avant d'étudier avec la même méthode un prototype plus complexe se rapprochant davantage de l'inductance de type sec utilisée sur le réseau de transport d'électricité.

## **1.2 Vers une caractérisation robuste du comportement vibratoire d'une structure boulonnée en présence de paramètres incertains**

M. Ghienne<sup>1</sup>, C. Blanzé<sup>1</sup>, L. Laurent<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés, Paris*

Les liaisons, boulonnées ou rivetées, jouent un rôle clé sur le comportement vibratoire des structures assemblées. Elle sont notamment responsables d'une grande partie de l'amortissement de la structure et peuvent avoir un comportement assouplissant ou rigidifiant. Les phénomènes mis en jeu dans les liaisons sont non linéaires et il est nécessaire d'en tenir compte dès la phase de conception. De plus, afin de dimensionner la structure de manière robuste dans le domaine vibratoire, il est nécessaire de tenir compte de la variabilité des paramètres influents. Les approches probabilistes sont particulièrement adaptées à la caractérisation des vibrations de structure en présence de paramètres aléatoires. Cependant les méthodes classiques de résolution du problème vibratoire aléatoire sont basées sur un échantillonnage statistique et

sont donc très coûteuses en temps de calcul. Le cumul de ce coût de calcul à celui lié à la prise en compte des non-linéarités ne permet pas d'envisager la caractérisation vibratoire d'une structure assemblée présentant un grand nombre de liaisons dans un temps raisonnable. On va donc chercher à réduire le modèle probabiliste. Pour cela, en se limitant dans un premier temps au cas linéaire, une nouvelle approche est proposée appelée : Réduction de Modèle Stochastique (SMR).

L'approche SMR permet, à partir d'un modèle de structure discrétisée par éléments finis à l'aide de n'importe quel code commercial, de caractériser de manière robuste sa réponse vibratoire en présence de paramètres incertains. En particulier, elle permet de manière non intrusive de caractériser les espaces propres aléatoires des systèmes linéaires dont les propriétés dynamiques sont représentées à l'aide de variables aléatoires. En adaptant la finesse du modèle stochastique à chacune des fréquences propres aléatoires recherchées, cette approche ne nécessite alors qu'un très faible nombre de calculs déterministes ce qui la rend très efficace comparée aux approches statistiques classiques (Monte-Carlo).

Cette présentation a deux objectifs principaux. L'approche SMR ayant été éprouvée sur différents exemples académiques, le premier objectif est alors d'appliquer l'approche SMR au cas d'une structure industrielle ayant un (relativement) grand nombre de degrés de liberté. La méthode étant non intrusive la structure est discrétisée avec NASTRAN. L'efficacité de l'approche pour estimer les moments statistiques des fréquences propres aléatoires de la structure est montrée par comparaison à une simulation de Monte-Carlo. Le cas industriel traité considère des variables aléatoires correspondant à des grandeurs « réparties » sur la structure (modules d'Young). Le deuxième objectif est d'étendre l'application de l'approche au cas de structures assemblées où la variabilité des paramètres intervient localement au niveau des liaisons. La fiabilité de la méthode est montrée sur un cas plus académique : un portique dont les liaisons sont modélisées par des raideurs variant aléatoirement.

## 1.3 Surveillance vibratoire d'une transmission de puissance à engrenages planétaires

E. Hubert<sup>1,2</sup>, M. El Badaoui<sup>2</sup>

1. *SAFRAN Tech*

2. *Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels, Saint-Etienne*

Le contrôle et le diagnostic sont des thématiques en pleine expansion dans divers secteurs de l'industrie, donc l'aéronautique. Cela consiste à surveiller des paramètres physiques tels que l'accélération, la température ou encore la déformation afin d'évaluer l'état mécanique réel du système et ainsi prévenir l'apparition de défauts. Cette démarche permet de surveiller un moteur par exemple à des fins de sécurité mais aussi d'optimiser la planification des maintenances et en réduire le coût.

L'objectif de cette étude est de caractériser l'état de fonctionnement d'un système mécanique de type engrenage afin de réaliser un diagnostic préventif. La caractérisation mécanique commence par la compréhension de la cinématique du système et la réalisation d'un modèle numérique du signal vibratoire. Ce modèle permettra de comprendre comment est affectée la réponse fréquentielle du système en fonction du type des défauts qui apparaissent (localisé, généralisé...) et aussi de créer une base d'indicateurs statistiques et/ou spectraux qui indiquent l'apparition et la localisation du défaut (éventuellement la sévérité).

Une première étape est l'étude d'un système mécanique simple, ici un engrenage droit. Dans un premier temps, le spectre du signal vibratoire est modélisé afin d'être comparé aux signaux provenant d'une mesure d'un système réel. Le banc d'essai utilisé fait fonctionner l'engrenage pendant 12 jours, et montre l'évolution de l'usure naturelle de ce dernier. Dans un second temps, les indicateurs RMS, KURTOSIS et coefficients cepstraux sont testés et comparés. Il apparaît que le cepstre d'énergie permet une détection et une localisation optimale du défaut d'écaillage.

Dans une seconde étape, nous nous intéressons à un engrenage planétaire, c'est-à-dire que l'ensemble des roues est en mouvement relatif les unes par

rapport aux autres. L'étude de la cinématique de l'engrenage et l'analyse des spectres des signaux accélérométriques nous a permis d'identifier un premier modèle spectral du signal vibratoire. À partir de ce spectre nous avons proposé un modèle temporel du signal vibratoire. Par la suite, il servira de support pour définir des indicateurs de défaillances.

## 1.4 Couplage des méthodes Galerkin discontinue avec ondes planes et éléments finis pour l'acoustique

M. Gaborit<sup>1,2</sup>, O. Dazel<sup>1</sup>, P. Göransson<sup>2</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Marcus Wallenberg Laboratory, Royal Institute of Technology (KTH), Suède*

L'objet de ce travail est de proposer un couplage efficace entre Méthode des éléments Finis (MEF) et la Méthode de Galerkin Discontinue avec ondes planes (Plane Wave Discontinuous Galerkin Method en anglais, PWDGM) pour la résolution de problèmes acoustiques.

La MEF est basée sur la discrétisation spatiale du problème et les champs sont interpolés sur chacun des éléments au moyen de polynômes et des valeurs aux nœuds du maillage. La possibilité d'utiliser un maillage non structuré permet à la MEF de s'adapter aux géométries complexes.

D'autres méthodes existent et certaines reposent par exemple sur un développement des champs sur une base d'ondes planes. C'est le cas de la PWDGM où un ensemble d'ondes planes permettent de reconstruire le champ. La PWDGM se comporte particulièrement bien pour des maillages aux grands éléments où le champ est peu perturbé (pas d'élément diffractant). Un avantage majeur est le faible nombre de degrés de liberté requis pour une bonne approximation.

L'intérêt du couplage proposé est d'utiliser la capacité d'adaptation de la MEF pour les détails fins de la géométrie et l'excellent rapport précision/coût de la PWDGM pour les zones sans diffracteur.

La procédure de couplage s’articule autour de la ré-écriture des opérateurs d’interface. Une matrice de couplage est introduite afin de lier les quantités nécessaires à l’évaluation des intégrales de surface aux quantités disponibles sur le maillage.

Après avoir dérivé les nouvelles équations du couplage, plusieurs tests sont menés. Les premiers résultats (sur des systèmes académiques) confirment les prévisions quant à l’ordre de convergence. Des tests plus approfondis sont mis en place pour comprendre comment MEF et PWDGM peuvent être utilisées de concert pour simuler des systèmes moins triviaux. La performance de la méthode hybride est ainsi particulièrement testée sur des cas défavorables pour la PWDGM ou la MEF seule.

Dans un second temps, ces équations de couplage devront être établies pour des physiques plus complexes (matériaux poroélastiques notamment).

## 1.5 Étude expérimentale d’un absorbeur de bruit non linéaire actif

P.-Y. Bryk<sup>1</sup>, R. Côte<sup>1</sup>, S. Bellizzi<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique et d’Acoustique, Marseille*

Un absorbeur acoustique passif non linéaire précédemment développé au LMA constitue le point de départ de nos travaux. Il s’agit d’une membrane en latex dont l’une des faces est couplée au milieu acoustique à traiter. Ce type d’absorbeur, qualifié de NES pour Nonlinear Energy Sink, s’accorde au milieu primaire du fait de sa non-linéarité et se déclenche à partir d’un certain niveau d’énergie présent dans le milieu primaire. Il possède certaines limitations, comme un niveau de déclenchement élevé ( $\sim 200$  Pa) ou encore le rayonnement dans le spectre audible de l’énergie absorbée en basses fréquences.

Notre objectif est donc de développer une version active et encoffrée de ce NES afin de contourner ces limitations. Nous présentons ici les résultats expérimentaux obtenus avec un premier prototype de NES encoffré actif. Il

est composé de la membrane non linéaire dont la face arrière est couplée à un haut parleur de contrôle à l'aide d'un volume d'encoffrement tandis que la face avant est couplée à un tube résonant au sein duquel on veut réduire la pression acoustique. Le haut-parleur est commandé en feedback à l'aide d'un microphone de mesure placé dans l'encoffrement et a pour but d'atténuer la pression générée dans le volume d'encoffrement par le déplacement de la membrane. Les résultats expérimentaux montrent que cette version active permet d'optimiser la réduction du bruit dans le tube résonant excité sur sa première fréquence de résonance et ouvrent la voie à des stratégies de contrôles plus élaborées, tels qu'un gain variable pour la boucle de feedback du haut-parleur de contrôle.

## 1.6 Numerical modelling of impulse sound propagation

M. Cosnefroy<sup>1,2</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, Lyon*

2. *Institut Saint-Louis, Saint-Louis*

Situational awareness for defence and security applications is a key point to reduce casualty risks and improve mission success rate. Among other detection systems, acoustic sensors are light, cheap and robust, and can provide omnidirectional, non-line-of-sight survey of the battlefield.

Influence of the environment on the recorded acoustic signals is however not well understood, as outdoor acoustics involves many complex, coupled physical phenomena (such as refraction, attenuation, dispersion and scattering) due to atmospheric absorption, vertical wind and temperature gradients, turbulence, ground effects and obstacles. Previous studies have shown that this lack of knowledge degrades the performance of present signal processing algorithms used to detect, localize and classify threats. The purpose of this work is to contribute to assess and improve the performance of acoustic localization antennas.

Numerical modelling of such a problem is an alternative to an expensive, time-consuming systematic recourse to experimental measurements, and allows control of input parameters and reproducible tests. As such, ITM is an ISL in-house Finite-Difference Time-Domain (FDTD) parallel numerical software which solves the linearized equations of outdoor acoustics, and was shown to give full account of the aforementioned physical processes.

Battlefield acoustics however typically involves impulse sounds propagating over large distances and featuring high-frequency components. Accurate long-range numerical predictions of such sounds are thus challenging in terms of computing resources, even for high-performance computer clusters.

This presentation aims to succinctly describe the FDTD method for acoustics, as well as some advanced methods to lower computational costs in order to accurately address operational configurations. The latter include spatial and temporal discretisation schemes optimised to minimise numerical dispersion errors, and improved time-domain frequency-dependent boundary conditions using the reflection coefficient.

## 1.7 Filtrage adapté stochastique appliqué à la détection de plongeurs

L. Bouffaut<sup>1</sup>, R. Dréo<sup>1</sup>, V. Labat<sup>1</sup>, A.-O. Boudraa<sup>1</sup>

1. *Institut de Recherche de l'Ecole Navale, Brest*

Dans un contexte de protection portuaire, l'un des enjeux actuels est la détection d'intrus et plus particulièrement celle de plongeurs. Les méthodes utilisées en acoustique sous-marine passive, de par leur discrétion, en sont donc les outils tout indiqués. Cependant, la nécessité de réaction rapide des opérateurs en surveillance (les plongeurs se déplacent vite et silencieusement !) ouvre un champ de recherche pour améliorer les performances des systèmes et techniques de détection utilisés. Le Filtrage Adapté Stochastique (FAS) est initialement présenté en 1991 par J.-F. Cavassillas comme une extension du filtrage adapté (actif) pour un signal aléatoire en présence de bruit coloré.

Le présent travail propose un développement du FAS comme une méthode de traitement du signal passif en temps réel. La faisabilité a été démontrée par une application sur des signaux de plongeurs enregistrés en cuve. Les premiers résultats permettent en sus, de lever les hypothèses du FAS classique et de maximiser le RSB en sortie.

## 1.8 Résonateur de Helmholtz à volume variable à base d'EAP pour le contrôle vibro-acoustique

A. Abbad<sup>1,2</sup>, K. Rabenorosoa<sup>1</sup>, M. Ouisse<sup>1</sup>, N. Atalla<sup>2</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*

2. *Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (Canada)*

Un résonateur de Helmholtz passif est un dispositif acoustique utilisé pour contrôler une fréquence unique résultante du volume de la cavité et de la taille du col du résonateur. Le but de l'étude proposée est de présenter un nouveau concept et des stratégies permettant d'ajuster en temps réel le résonateur afin d'améliorer les performances d'absorption acoustique en basses fréquences (<500 Hz). Le concept proposé consiste à remplacer la plaque frontale rigide du résonateur par une membrane polymère électroactive (EAP). Lorsqu'un champ électrique est appliqué, une modification est apportée aux propriétés mécaniques de la membrane EAP, ce qui induit un décalage de fréquence de résonance. Des ressorts installés sur l'ensemble permettent de diriger la déformation de la membrane suivant l'axe du résonateur pour obtenir une variation de volume de la cavité. Ces deux stratégies permettent de varier les fréquences de résonance du dispositif. Des mesures expérimentales sont effectuées afin de déterminer le potentiel de ce concept pour l'amélioration des performances en basses fréquences des dispositifs d'absorption acoustique.

## 1.9 Reconception d'un viscoanalyseur pour la caractérisation haute fréquence de matériaux viscoélastiques

A. Chassaigne<sup>1</sup>, J.-L. Dion<sup>1</sup>, F. Renaud<sup>1</sup>

1. *Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux, Supmeca, Montreuil*

Les matériaux aux comportements viscoélastiques tels que les polymères ou certaines colles sont régulièrement utilisés dans les assemblages afin de limiter les niveaux de vibration. Ils ont pour particularités d'avoir une raideur dynamique qui varie en fonction de la fréquence. Une méthode de caractérisation classique passe par la réalisation d'une analyse mécanique dynamique. Les résultats obtenus sur une plage fréquentielle souvent restreinte peuvent être étendus grâce à l'équivalence fréquence-température qui est réputée valable pour les matériaux polymères. Dans cette étude, un viscoanalyseur développé précédemment est amélioré afin d'étendre la caractérisation directe jusqu'à 10 kHz. Il repose sur un montage à 4 échantillons symétriques. Les échantillons peuvent ainsi être soumis à un cisaillement pur pour des valeurs de précharge pouvant atteindre 5000 N. L'obtention des données matériaux sur une large plage fréquentielle permet d'accélérer le protocole de test et de s'affranchir de ces équivalences.

## 1.10 Modélisation multi-échelle des propriétés de transport et acoustiques de matériaux fibreux

H. T. Luu<sup>1,2</sup>, C. Perrot<sup>1</sup>, V. Monchiet<sup>1</sup>, R. Panneton<sup>2</sup>

1. *Laboratoire de Modélisation et Simulation Multi Echelle, Marne-la-Vallée*

2. *Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (Canada)*

On s'intéresse en particulier dans ce travail à la description des phénomènes de dissipation et de propagation des ondes acoustiques dans un milieu fibreux par une approche multi-échelle et multi-physique. Dans cette étude, il s'agit de décrire les propriétés acoustiques du milieu fibreux à partir d'une

description de la géométrie à l'échelle locale de milieux fibreux. Le milieu fibreux est constitué de fibres d'asclépiades, qui sont typiquement des fibres végétales adoptant la forme de longs cylindres. Pour traiter ce problème, la méthodologie employée consiste en quatre étapes principales : (1) caractérisation et modélisation de la géométrie du milieu fibreux; (2) calcul des paramètres de transport et acoustiques du milieu fibreux reconstruit; (3) validation expérimentale de propriétés de transport et acoustiques; (4) évaluation des évolutions de propriétés de transport en fonction des paramètres de la géométrie à l'échelle locale du matériau. En particulier, un modèle isotrope spatialement stationnaire de lignes droites (processus de Poisson), et le tenseur d'orientation angulaire, constituent des outils de modélisation de la géométrie aléatoire du milieu fibreux permettant de représenter les principales caractéristiques susceptibles d'influencer ses propriétés de transport. Il s'agit ensuite de résoudre les principaux problèmes aux limites gouvernant le comportement acoustique à l'échelle supérieure en appliquant la technique de l'homogénéisation numérique.

## 1.11 Approches probabilistes pour l'analyse des performances vibro-acoustiques d'un véhicule

G. Brogna<sup>1</sup>, L. Gagliardini<sup>2</sup>, J. Antoni<sup>1</sup>, O. Sauvage<sup>1</sup>, N. Totaro<sup>1</sup>

1. *Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA, Lyon*

2. *PSA Peugeot-Citroën, Vélizy-Villacoublay*

Dans le monde de l'automobile (et de l'industrie en général) la course pour mettre au point des modèles numériques de plus en plus prédictifs continue. Pour mieux répondre aux attentes des clients, il est essentiel de savoir prédire le confort acoustique et vibratoire dans l'habitacle de la voiture pour un grand nombre de situations différentes. Néanmoins, n'utiliser que quelques modèles déterministes n'est pas suffisant pour guider les nombreuses décisions à prendre au cours des projets. Dans le modèle qui décrit le bruit à l'intérieur de la voiture comme une somme de contributions données par le produit

entre efforts et transferts, les sources d'incertitudes sont multiples et leur influence sur les résultats est d'ordre un. Pour ce qui concerne la structure, chaque voiture produite est différente à cause des dispersions de production et aucune n'est égale au modèle déterministe utilisé. Pour ce qui concerne les efforts injectés dans la structure par le moteur, les roues et les autres parties actives, ils dépendent de beaucoup de paramètres environnementaux, dont la qualité du revêtement de la route et le comportement du client. Approcher le problème global d'un point de vue probabiliste doit permettre de prendre en compte et gérer au mieux les informations connues sur les dispersions et les situations de vie du véhicule.

Pour les modèles de structure, l'approche non-paramétrique développée par C. Soize est adoptée pour reproduire la dispersion des transferts mesurés. Pour les modèles d'efforts, nous explorons les techniques d'inférence Bayésienne : à partir de mesures, des modèles probabilistes d'effort en fonction des conditions de fonctionnement et des conditions de route sont construits. Les erreurs de modèle et les incertitudes de mesure sont ainsi caractérisées. Ces types d'algorithmes d'inférence ont l'avantage de permettre l'introduction dans le modèle de ce qu'on appelle la connaissance a priori : en plus d'avoir un rôle de régularisation pour la résolution du problème, elle permet de rendre compte du savoir-faire métier qui si souvent a du poids en entreprise. De plus, des approches de type « choix de modèle » permettent de tester l'efficacité de plusieurs modèles prédictifs et de sélectionner le plus probable par rapport aux données mesurées.

Une fois tous les modèles probabilistes construits, la synthèse est possible. Avec des distributions des conditions de fonctionnement typique de l'utilisation client en entrée, les distributions des efforts injectés sont obtenues grâce aux modèles précédents. Elles sont combinées par Monte Carlo avec les distributions des transferts pour propager l'incertitude vers le niveau acoustique à l'intérieur de l'habitacle. Finalement, un indicateur de performance acoustique qui tient compte de l'utilisation clientèle de la voiture et pas seulement des conditions les plus contraignantes pourra être proposé.

## 1.12 Méthodes numériques performantes pour le calcul des vibrations auto-entretenues dans les problèmes de crissement au freinage

L. Charroyer<sup>1,2,3</sup>, O. Chiello<sup>1,3</sup>, J.-J. Sinou<sup>2,3,4</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique Environnementale (IFSTTAR/AME/LAE), Bouguenais*
2. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Écully*
3. *CeLyA, Lyon*
4. *Institut Universitaire de France, Paris*

Le sujet s'inscrit dans le cadre de recherches destinées à réduire ou à éliminer les bruits de crissement émis par les véhicules ferroviaires au freinage, particulièrement gênants pour les personnes exposées, riverains ou passagers.

Les modèles vibro-acoustiques sont de plus en plus utilisés pour diminuer les coûts de prototypages et d'essais réels de structures. Cependant, les industriels se voient confrontés à un autre verrou : le temps de calcul des simulations numériques. C'est particulièrement vrai dans les problèmes de bruit de crissement pour lesquels des vibrations auto-entretenues de structures, induites par des phénomènes de contact frottant fortement non linéaires, apparaissent à hautes fréquences. Le calcul de ce type de vibrations à l'aide d'une intégration numérique classique des équations du mouvement est très coûteuse en temps de calcul et taille mémoire, en particulier si l'on souhaite atteindre le régime stationnaire de la solution.

Cette thèse a donc pour but de proposer des alternatives pour réduire ces coûts de calcul. Une méthode simplifiée, basée notamment sur l'observation des échanges d'énergies vibratoires dans ce type d'oscillations auto-induites, été développée pour estimer le régime stationnaire de la solution temporelle. Les résultats de cette estimation énergétique sont ensuite utilisés pour initialiser une méthode itérative de tir, convergeant vers le régime stationnaire exact du problème.

Les résultats obtenus sur un modèle académique sont concluants et encourageants pour implémenter ces méthodes sur des modèles de frein industriels.

## 1.13 Propriétés acoustiques de matériaux perforés comprenant des pores dead-end périodiques pour des applications basses fréquences

A. Lardeau<sup>1</sup>, T. Dupont<sup>1</sup>, A. Geslain<sup>1</sup>, P. Leclaire<sup>1</sup>

1. *Département de Recherche en Ingénierie des Véhicules pour l'Environnement, Nevers*

Pour un matériau absorbant tel que la mélamine et pour une épaisseur assez faible (inférieure à 5 cm), l'absorption acoustique devient supérieure à 0.8 à partir d'une fréquence de l'ordre de 1000 Hz. Des matériaux perforés peu épais comportant le long des perforations des pores dead-ends (DE) régulièrement espacés peuvent permettre de produire des pics d'absorption supérieurs à 0.8 en basses fréquences (quelques centaines de Hz). Les dimensions des pores DE ainsi que leur périodicité peuvent être millimétriques ou submillimétriques de sorte que l'épaisseur totale du matériau soit de seulement quelques centimètres. Ces pores DE peuvent être des résonateurs de type quart d'onde, Helmholtz ou des géométries plus complexes. La disposition périodique de ces pores DE suivant la direction de propagation de l'onde permet, avec un nombre suffisant de périodes, d'induire un phénomène de slow sound ou onde ralentie. Ces matériaux peuvent être modélisés avec le formalisme des matrices de transfert (TMM) ou par éléments finis ou encore par l'analyse de la relation de dispersion avec une approximation basses fréquences.

Un tel matériau est fabriqué à partir d'un assemblage de deux types de plaques d'aluminium d'épaisseur 1 mm, l'une présente les perforations principales et l'autre présente les cavités DE. L'absorption acoustique en incidence normale est mesurée avec un tube à impédance. Dans un premier temps, la TMM et les mesures ne sont pas en accord. Un recalage des courbes est opéré par la prise en compte d'une dispersion des dimensions des différentes plaques et d'un terme correctif sur la tortuosité. Une étude numérique du couplage entre deux cellules successives est en cours d'étude.

## 1.14 Développement d'outils d'aide à la conception pour luthiers

R. Viala<sup>1</sup>, V. Placet<sup>1</sup>, S. Cogan<sup>1</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*

Les études d'acoustique musicale se basent historiquement en grande partie sur des approches analytiques et expérimentales. Ces approches s'avèrent représentatives de la réalité mais ne sont pas nécessairement les mieux adaptées pour étudier l'impact de modifications de conception d'un instrument.

Le prototypage virtuel basé sur les modèles physiques est devenu un outil performant dans le domaine industriel pour l'aide à la décision par le biais des analyses de criblage, de quantification d'incertitude, et de conception de systèmes complexes. Il représente actuellement un enjeu majeur dans les milieux industriels et de recherche. Il y a donc une opportunité à saisir pour le transfert de cette technologie vers d'autres domaines. Des travaux de recherche ont pour but d'explorer les potentialités de cette approche pour l'acoustique musicale et en particulier la facture d'instruments à corde. En effet, cette dernière est limitée par l'irréversibilité des modifications, le coût important de matière première et le temps de fabrication.

Le prototypage virtuel pourrait pallier à certaines de ces difficultés de part les possibilités d'effectuer des études paramétrées en amont, en particulier : de proposer un support pour orienter les essais, de prospecter de nouveaux concepts de facture instruments, d'explorer des possibilités de remplacement des bois traditionnels par des bois locaux, de contribuer aux technologies de synthèse sonore et d'offrir un support aux études de phénomènes vibratoires.

Le sujet présenté porte sur le développement de logiciels de simulation dédiés aux luthiers. L'exemple utilisé est celui d'une table d'harmonie de guitare en épicéa, paramétrable, sur laquelle l'utilisateur peut modifier l'emplacement et le nombre de découpes circulaires (appelées rosaces) et de raidisseurs (barrages), consistant en des barres d'épicéa de différentes tailles collées sur la table. De plus il est possible de modifier les propriétés du matériau uti-

lisé (Rigidités orthotropes, densité) et les conditions aux limites de l'étude (libre ou encasté sur ses bords) afin de s'approcher du comportement de la table d'harmonie lorsque celle-ci est collée sur la guitare ou testée par le luthier. L'interface développée sur MATLAB permet de façon ergonomique d'implémenter ces paramètres, puis les différentes étapes sont automatisées, jusqu'à l'affichage des déformées propres simulées. Cet outil, dédié aux luthiers, a pour but de leur permettre d'observer les effets de modifications (de la conception, de matériau) sur le comportement vibratoire d'un élément de guitare. Des analyses de criblage des paramètres du matériau ou de la géométrie pourront aussi être effectuées afin de classer ces derniers suivant leur impact sur le comportement vibratoire et statique de l'instrument de musique étudié. Une corrélation numérique-expérimental entre des tables fabriquées et celles simulées sera effectuée afin de déterminer la prédictibilité du modèle numérique.

## 1.15 Caractérisation de sources vibratoires par méthode inverse et régularisation Bayésienne

C. Faure<sup>1</sup>, C. Pézerat<sup>1</sup>, J. Antoni<sup>2</sup>, F. Ablitzer<sup>1</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA, Lyon*

Des modèles de plus en plus précis sont développés pour prédire le comportement vibroacoustique des structures et dimensionner des traitements adaptés. Or, les sources vibratoires, qui servent de données d'entrée à ces modèles, restent assez souvent mal connues. Une erreur sur les sources injectées se traduit donc par un biais sur la prédiction vibroacoustique. En amont des simulations, la caractérisation expérimentale de sources vibratoires en conditions opérationnelles est un moyen de réduire ce biais et fait l'objet de ces travaux de thèse.

L'approche proposée utilise une méthode inverse, RIFF, permettant l'identification de sources à partir des déplacements de structure. La sen-

sibilité aux perturbations de mesure, commune à la plupart des méthodes inverses, est traitée dans un cadre probabiliste par des méthodes Bayésiennes. Ce formalisme Bayésien permet :

1. une meilleure robustesse de la méthode RIFF,
2. la détection automatique de sources sur la distribution spatiale,
3. la propagation des incertitudes de mesures sur l'évaluation du spectre d'effort,
4. l'évaluation de la qualité de la mesure par un indicateur de RSB,
5. l'identification parcimonieuse pour le cas de sources ponctuelles,
6. l'identification de paramètres de modèle pour les structures homogénéisées.

Les points 3 et 4 sont obtenus avec une unique mesure de déplacements de la structure, là où des approches statistiques plus classiques demandent une campagne de mesures plus conséquente. De plus, la procédure est en grande partie non-supervisée. Il ne reste alors à la charge de l'utilisateur qu'un nombre restreint de paramètres à fixer. Les approches proposées peuvent donc être utilisées dans une certaine mesure comme des boîtes noires.

# Presentation of the Young Acousticians Network

The EAA Young Acousticians Network (YAN) is a non-profit initiative within the European Acoustics Association (EAA). Our primary goal is to establish a community for young researchers and young professionals in the field of Acoustics; to connect them and to provide support. We organise events at conferences and provide not-for-profit services that contribute to the community. These services include the EAA YAN website, a monthly newsletter and many communication channels to enable networking.

The YAN is addressed to any young acoustician (under 40 years old) from worldwide, including MSc and PhD students, post docs, researchers, consultants and engineers.

Website : <https://euracoustics.org/yan/about>

# 2 Session 2

## 2.1 Modélisation des vibrations générées par des écoulements en conduit

F. Hugues<sup>1</sup>, E. Perrey-Debain<sup>1</sup>, N. Dauchez<sup>1</sup>

1. *Laboratoire Roberval, UTC, Compiègne*

Les vibrations induites par un écoulement sont fréquemment observées dans les réseaux de tuyauterie dans divers types d'applications telles que les conduits d'air dans les systèmes de climatisation (HVAC) ou les conduits de transport de gaz dans l'industrie. Ces vibrations du conduit peuvent occasionner des nuisances sonores et engendrer un vieillissement prématuré des structures nécessitant parfois des renforcements après montage, difficiles à mettre en œuvre et très coûteux. L'objectif principal de la thèse est de développer des modèles numériques, permettant une meilleure compréhension des phénomènes physiques de génération du bruit ainsi que des vibrations engendrées (i) par un écoulement turbulent seul dans un conduit droit et (ii) par la formation de détachements tourbillonnaires à la suite d'une discontinuité dans le conduit (coude, changement de section, présence d'un diaphragme...).

L'accent sera mis sur l'influence des composantes acoustiques et aérodynamiques sur la réponse vibratoire. La composante aérodynamique de l'excitation est appliquée sur la base du modèle de Corcos et la composante acoustique sur les modes se propageant dans la gaine. Elles seront comparées à la simulation numérique à l'aide d'un code commercial CFD (STAR-CCM+). Une méthode expérimentale (2N port) sera présentée et des mesures vibratoires et acoustiques pour deux vitesses d'écoulement.

## 2.2 Modélisation éléments finis non-linéaire de réservoirs élastiques soumis à une charge suiveuse pour le calcul des vibrations hydroélastiques

C. Hoareau<sup>1</sup>, J.-F. Deü<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés, Paris*

Ce travail concerne l'étude du comportement dynamique de structures élastiques contenant des liquides internes avec surface libre. Cette problématique d'interaction fluide-structure fait encore l'objet de recherches notamment dans le domaine aéronautique et spatial pour le dimensionnement de réservoirs d'ailes d'avions, de satellites ou de lanceurs spatiaux. Les structures devenant plus légères et plus souples, les approches linéarisées peuvent être remises en cause dans certains cas d'application. L'objectif de ce travail est donc de prendre en compte d'éventuelles non-linéarités structurales dans les problèmes hydroélastiques avec gravité. Nous nous intéressons dans un premier temps à la résolution de problèmes de vibrations. Nous verrons que les formations éléments finis (EF) existantes permettent de résoudre le problème dynamique couplé à moindre coût à partir de techniques de projection sur bases modales adaptées. Dans un second temps, nous développons une modélisation EF non linéaire quasi-statique d'un réservoir flexible soumis à des forces hydrostatiques dues à la présence d'un liquide interne incompressible. Ce problème non-linéaire sera résolu grâce à une méthode itérative de Newton-Raphson qui nécessite le calcul des opérateurs de raideur géométrique, matériau et des forces suiveuses. Le calcul de ces opérateurs tangents est délicat du fait de leur dépendance à (i) l'incrément de déplacement normal de la surface mouillée et (ii) la variation du niveau de la surface libre horizontale. La solution du problème doit de plus garantir la conservation du volume de fluide. Nous montrerons qu'une attention particulière doit être portée à la discrétisation spatiale de la structure et de la surface mouillée, et qu'il n'est pas nécessaire de discrétiser le domaine fluide. Deux méthodes

seront envisagées pour calculer les forces internes et externes des équations d'équilibre non linéaires : une stratégie de remaillage et une stratégie de découpage des éléments par une méthode de ligne de niveau. À terme, il s'agira de calculer les vibrations d'un réservoir autour d'un état précontraint issu d'un calcul non linéaire quasi-statique en grands déplacements.

## 2.3 Localisation in the piano soundboard

G. Lefebvre<sup>1</sup>, M. Filoche<sup>2</sup>, X. Boutillon<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique des Solides, Palaiseau*

2. *Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Palaiseau*

The soundboard is the complex plane structure that radiates the piano sound. We focus on its structural vibrations. The arrangement of the stiffeners (parallel bars) displays some disorder (height, separation distance) that has been shown responsible for the localization of the vibrations above a precise frequency (Ege 2013, JSV ; Chaigne 2013, JASA.) By means of a finite-element method, we investigate the localization properties of the eigenmodes of a simplified soundboard model. The localization occurs close to the band-edge of the first Brillouin zone, indicating the importance of a slightly disordered structure, similarly to photonic or phononic crystals with defects (John 1987, PRL). For structural parameters typical of a piano soundboard, this phenomenon seems to force the soundboard to remain in the subsonic regime in a very large frequency range. Moreover, by the adaptation of the theory of the localization landscape (Filoche 2012 PNAS) we compute a dual landscape (Lyra 2015 EPL) for the high frequency modes of a stiffened orthotropic thin plate. This enables to predict the position of localized eigenmodes.

Work supported by the ANR grant ANR-14-CE07-0014.

## 2.4 Simulations numériques pour la caractérisation de sources acoustiques en tunnel hydrodynamique avec adaptation de modèle et réduction du bruit de couche limite

S. Amailland<sup>1</sup>, J.-H. Thomas<sup>1</sup>, R. Boucheron<sup>2</sup>, C. Pézerat<sup>1</sup>, J.-C. Pascal<sup>1</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Direction Générale de l'Armement, Val-de-Reuil*

Les exigences en matière de réduction du bruit généré par les navires de la marine et de recherche sont en forte croissance. Afin d'une part, de satisfaire les réglementations et d'autre part, de réduire les effets sur la vie marine, de nouvelles méthodes dédiées à la caractérisation du rayonnement acoustique de propulseur, source acoustique principale en champ lointain, sont nécessaires. L'étude des propulseurs cavitants en tunnel permet d'analyser les performances hydrodynamiques des hélices mais engendre des difficultés pour l'étude des performances hydroacoustiques à cause de la réverbération et du bruit de couche limite turbulente dans le tunnel.

L'objectif de ces recherches est de développer une méthodologie pour l'identification de sources hydroacoustiques en utilisant un réseau d'hydrophones dans le tunnel hydrodynamique. La pertinence des résultats dépend du modèle de propagation, de la qualité, en terme de rapport signal à bruit, des mesures et du conditionnement du problème inverse. Ce travail basé sur des expérimentations numériques, se divise en quatre parties :

- Modélisation de la propagation acoustique et du bruit de couche limite dans le tunnel hydrodynamique,
- Implémentation d'une méthode pour recalibrer le modèle de propagation en utilisant des fonctions de transfert de référence,
- Réduction du bruit de couche limite hydrodynamique,
- Caractérisation de sources acoustiques basée sur des algorithmes de formation de voies et de déconvolution.

Le problème direct est résolu en utilisant la théorie des sources images.

Cependant, dans la plupart des cas, l'hypothèse de frontières rigides n'est pas respectée et les coefficients de réflexion des parois du tunnel peuvent être difficiles à estimer. Dans cette communication, il est proposé d'estimer ces coefficients par une méthode inverse et des fonctions de transfert de référence, en supposant les parois identiques. Dans la plupart des cas, les problèmes inverses sont mal posés et sont délicats à résoudre. Cette étude propose d'introduire le principe de parcimonie sur les dérivées successives des coefficients de réflexion. Une matrice de régularisation est alors proposée pour imposer une faible variation des solutions appartenant au même ordre de réflexion. Ce processus d'adaptation permet de réduire les erreurs sur le modèle de propagation.

Le bruit de couche limite, induit par l'écoulement d'eau, est simulé par des modèles semi-empiriques de pression pariétale (Corcos/Goody). Généralement, la partie convective de l'écoulement est plus forte que la partie acoustique, et donc des techniques de nettoyage sont nécessaires pour réduire le bruit de couche limite. Une méthode de débruitage exploitant les propriétés de rang faible et de parcimonie de la partie acoustique et du bruit de couche limite de la matrice interspectrale est utilisée.

Enfin, les résultats d'imagerie acoustique illustrent l'amélioration apportée par les différentes techniques sur l'identification (localisation et quantification) des sources et sur la reconstruction du champ de pression.

## **2.5 Compréhension des phénomènes générateurs de bruit acoustique dans les habitacles automobiles**

J. Carpentier<sup>1</sup>, C. Pezerat<sup>1</sup>, J.-H. Thomas<sup>1</sup>, C. Bailly<sup>2</sup>, A. Berry<sup>3</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, INSA, Lyon*

3. *Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke (Canada)*

Dans une constante recherche d'amélioration du confort de l'utilisateur, l'industrie automobile cherche à réduire les bruits perçus comme gênants à l'in-

térieur de l'habitacle des véhicules. Une des principales sources responsables des nuisances sonores est l'écoulement instationnaire qui se développe autour de l'habitacle et qui provoque de grandes fluctuations de pressions pariétale. Ces phénomènes sont localisés sur différentes zones du véhicule, là où l'écoulement est perturbé. Parmi ces localisations, la vitre latérale amont subit des fluctuations de pression très fortes et très localisées.

Cette étude se concentre sur la sollicitation aéroacoustique subie par ce vitrage. Le but des travaux est d'appliquer une méthode inverse vibratoire pour calculer les distributions de forces excitatrices à partir d'un champ de vibration mesuré. Le principe est d'injecter les déplacements mesurés dans l'équation du mouvement de la structure. Pour ce faire, les dérivées spatiales sont calculées par approximation à l'aide d'un schéma aux différences finies judicieusement choisi. Dans la thèse, on s'intéresse en particulier à deux développements de la technique expérimentale : la méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée fenêtrée) et la méthode RIC (Résolution Inverse Corrigée). La finalité de la thèse est de pouvoir appliquer la méthode à une voiture réelle et d'aboutir à une méthodologie clé en main pour les constructeurs automobile.

## **2.6 Étude et développement d'une architecture logicielle et matérielle pour la télécommunication ultrasonore dans les matériaux solides**

B. Shchukin<sup>1,2</sup>, A. Le Duff<sup>1,2</sup>, R. Longo<sup>1,2</sup>, M. Chekroun<sup>2</sup>

1. *École Supérieure d'Électronique de l'Ouest, Angers*

2. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

En contrôle non destructif (CND), et en particulier dans le domaine de la surveillance de la santé des structures ou Structural Health Monitoring (SHM), les ondes guidées ultrasonores sont largement utilisées pour la localisation de défauts (méthodes actives) ainsi que pour la détection de chocs ou d'événements d'émission acoustique (méthodes passives). La mise en œuvre de ces méthodes nécessitent parfois de déployer sur la structure mécanique

à surveiller, un nombre important de transducteurs piézoélectriques, utilisés comme émetteur d'onde ultrasonore ou comme récepteur. La mise en réseau de ces transducteurs sur des structures, qui dans certaines situations peuvent présenter des dimensions très importantes, doit nécessairement s'accompagner d'une fonction de télécommunication. Aujourd'hui, de nombreux standards de communication permettent l'échange bidirectionnel de données à courte distance en utilisant des ondes radiofréquences. Cependant, la communication directe par le biais d'ondes électromagnétiques entre les différents nœuds d'un réseau de transducteurs n'est pas toujours possible compte tenu des contraintes opérationnelles comme la présence d'objets métalliques dans la structure ou un environnement électromagnétique très perturbé, par exemple. Dans cette thèse, les auteurs proposent d'exploiter la structure elle-même comme canal de transmission d'informations véhiculées par une onde porteuse ultrasonore et permettant l'échange de données numériques entre deux ou quelques transducteurs. Pour créer le réseau ultrasonore comme support d'information dans le contexte SHM on doit savoir quelles méthodes de télécommunications sont envisageables et quelles sont les performances de ces méthodes.

## **2.7 Conception et validation expérimentale d'un métamatériau avec interface polymère hautement dissipative**

K. Billon<sup>1</sup>, M. Ouisse<sup>1</sup>, E. Sadoulet-Reboul<sup>1</sup>, M. Collet<sup>2</sup>, G. Chevallier<sup>1</sup>, A. Khelif<sup>1</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*

2. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Écully*

Les structures périodiques possèdent des propriétés spécifiques en termes de propagation d'ondes, leur architecturation permet de les doter de propriétés que les structures conventionnelles ne possèdent pas. Les polymères sont très utilisés pour les applications nécessitant la réduction du niveau vibra-

toire, leur introduction dans des structures périodiques permet de coupler leurs propriétés amortissantes à l'effet de coupure lié à la périodicité. La capacité de ces matériaux à dissiper de l'énergie est maximale à la transition vitreuse. Il est ainsi possible d'utiliser la transition comme système de pilotage du comportement mécanique pour passer d'un système rigide et peu amorti à un système souple dissipatif. C'est dans cet esprit que nous proposons dans ces travaux de concevoir un métamatériau adaptatif dont le comportement peut être piloté par la température. Le métamatériau considéré est constitué d'une plaque en aluminium servant de support à des plots cylindriques distribués de façon périodique. Les cylindres, quant à eux, sont constitués d'une combinaison entre un polymère hautement dissipatif, le tBA/PEGDMA et d'une masselotte en aluminium. L'épaisseur du polymère a été choisie pour obtenir une bande interdite résonante plus basse que la bande interdite liée à l'interférence de Bragg, tout en respectant une contrainte liée au moyen d'élaboration de ce polymère. Un modèle adapté est nécessaire pour décrire la dépendance en fréquence du polymère. Le comportement viscoélastique du tBA/PEGDMA est approximé par un modèle fractionnaire de Zener. Les ondes se propageant dans la structure infinie sont identifiées par une analyse de dispersion à l'aide de la méthode « Shift cell operator ». Celle-ci est basée sur une reformulation du problème des équations aux dérivées partielles, la périodicité est incluse dans le comportement global de la structure avec des conditions de continuité imposées sur les bords de la cellule. Cette stratégie permet de résoudre le problème quelle que soit l'évolution en fréquence des propriétés de la cellule. Dans le but de valider la conception du métamatériau une étude de la propagation d'ondes dans la structure finie, intégrant une interface composée d'un ensemble distribué de cellules unitaires, est menée. Une comparaison entre les résultats de simulation de la structure accordable et les résultats expérimentaux est présentée. Deux états sont générés en changeant la température de l'interface polymère. À température ambiante, la bande interdite prédite par le diagramme de dispersion est visible autour de la fréquence du résonateur dimensionné en dessous de la fréquence de la bande interdite de Bragg. Passée la température de transition vitreuse, le

métamatériau a tendance à se comporter comme une plaque homogène.

## 2.8 Proposition d'un cadre pour la conception d'amortisseurs viscoélastiques

K. Jaboviste<sup>1</sup>, G. Chevallier<sup>1</sup>, E. Sadoulet-Reboul<sup>1</sup>, N. Peyret<sup>2</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*

2. *Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Mécaniques et des Matériaux, Supmeca, Montreuil*

Ce travail vise à fournir une boîte à outils pour la conception de stabilisateur d'image optique. Les deux dispositifs mécaniques et électro-mécaniques peuvent être utilisés pour stabiliser les appareils d'imagerie. Les dispositifs mécaniques sont constitués de matériaux viscoélastiques qui assurent l'amortissement et la flexibilité du système afin d'isoler les dispositifs optiques des vibrations et des chocs.

Le but de ces travaux est de donner un cadre pour la prise en compte du comportement des matériaux viscoélastiques dans différents types de simulations : analyse des valeurs propres complexes, réponse fréquentielle ou réponse temporelle. Pour atteindre cet objectif, le modèle de Maxwell généralisé est associé à une formulation d'état originale. Afin de réduire le coût de calcul, elle est associée à une méthode de réduction de modèle. Comme ces matériaux sont très sensibles aux variations de température, le modèle a été adapté pour facilement prendre en compte les différents champs de température sur le domaine.

De nombreux résultats sont présentés et comparés aux données expérimentales pour valider les algorithmes. D'ailleurs, dans un contexte où la température et donc la performance des isolants peuvent varier aléatoirement, un choix robuste optimal de la conception est étudié pour assurer l'efficacité des systèmes isolants.

## 2.9 Modélisation des liaisons dans les structures assemblées

M. Rosatello<sup>1</sup>, J.-L. Dion<sup>1</sup>, N. Peyret<sup>1</sup>

1. *Laboratoire QUARTZ, Supmeca, Saint-Ouen*

La méthode des éléments finis apporte des résultats souvent précis pour les systèmes linéaires homogènes. Toutefois, presque toutes les structures réelles sont constituées des différents composants, assemblés entre eux avec des vis, rivets ou autres types de fixations. Les liaisons introduisent des non-linéarités et des incertitudes dans l'évaluation des caractéristiques dynamiques de la structure, dont les fréquences propres et l'amortissement, dépendants de l'amplitude de sollicitation. Une propriété typique des structures assemblées est le fait que, même si les liaisons sont localement très non linéaires, la structure complète montre un comportement seulement faiblement non linéaire. En particulier, la valeur de l'amortissement peut cependant varier considérablement avec l'amplitude de sollicitation. Puisque la réponse dynamique dépend principalement de l'amortissement, la connaissance à priori de sa valeur dans la phase de conception est indispensable, spécialement dans le secteur aéronautique. Par contre, le problème est que l'évaluation des non-linéarités introduites par les liaisons reste délicate et, surtout, actuellement elle n'est pas prédictive. En fait, même si normalement on peut caractériser expérimentalement le comportement d'une structure assemblée avec un certain nombre de liaisons et procéder ensuite au recalage du modèle EF, il n'est pas actuellement possible de le prévoir même ayant les propriétés géométriques de la structure et des assemblages. L'amortissement provient de la dissipation d'énergie au sein des liaisons : ce mécanisme est en fait très compliqué parce qu'il dépend de micro-frottements entre les surfaces en contact, lui-même dépendant de plusieurs paramètres, dont la rugosité, les défauts de forme, le niveau de précharge, le type de liaison etc. Au vue de ces difficultés à disposer de tous ces paramètres, la mise en œuvre de macro-modèles comme le modèle d'Iwan s'avère pragmatique et pertinente. Une étude expérimentale

a été menée pour évaluer la réponse dynamique au choc de trois structures avec exactement la même liaison de type lap-joint, mais avec des modifications dans la géométrie. L'objectif de l'étude est de voir s'il est possible de construire un modèle unique de liaison qui reproduise les données expérimentales des trois structures. L'hypothèse de départ est que les modifications géométriques des structures entraînent des changements dans les sollicitations de la liaison sans changer les propriétés de la liaison. Pour déduire les caractéristiques non linéaires, des méthodes classiques dans le domaine de la dynamique des structures sont utilisées. Les résultats montrent les limites des méthodes utilisées et le besoin d'outils de calculs plus avancés et dédiés aux structures assemblées.

## **2.10 Caractérisation expérimentale d'absorbeurs linéaires et non linéaires à basse fréquence et fort niveau**

A. Chauvin<sup>1</sup>, S. Bellizzi<sup>1</sup>, R. Côte<sup>1</sup>, P. Herzog<sup>1</sup>, M. Monteil<sup>2</sup>, M. Pachebat<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille*

2. *Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures, INSA, Lyon*

L'absorption de vibrations et de bruit basses fréquences par des dispositifs passifs est difficile à mettre en oeuvre par des absorbeurs classiques tels que les matériaux poreux ou les résonateurs d'Helmholtz.

Les absorbeurs de Helmholtz permettent une atténuation en basses fréquences mais dans une plage fréquentielle étroite. Les matériaux poreux sont quand à eux efficaces en hautes fréquences mais inefficaces en basses fréquences.

Il a été démontré précédemment qu'un absorbeur vibro-acoustique non-linéaire est capable de réduire l'énergie d'ondes sonores basses fréquences ou de dissiper rapidement les vibrations d'une structure. Les vibrations de la structure sont alors transférées de façon irréversible vers l'absorbeur NES (Nonlinear Energy Sink). Ce phénomène de dissipation est connu sous le nom

de pompage énergétique. Le banc expérimental SKT (Short Kundt Tube) à été construit au LMA pour approfondir la compréhension du transfert d'énergie effectué par cet absorbeur non linéaire.

L'absorbeur non linéaire de type NES, composé d'une fine membrane visco-élastique circulaire et faiblement pré-tendue est caractérisé dans le SKT. Les résultats obtenus avec le banc expérimental notamment, sur l'étude du transfert d'énergie des basses fréquences vers les hautes fréquences sera présenté.

## 2.11 Mesure de vibration par vision 3D

T. Durand-Texte<sup>1,2,3</sup>, E. Simonetto<sup>2</sup>, S. Durand<sup>2</sup> M.-H. Moulet<sup>3</sup>, M. Melon<sup>1</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Laboratoire de Géodésie et de Géomatique, CNAM, Ecully*

3. *Centre de Transfert de Technologie du Mans*

La mesure de vibrations, désormais incontournable dans l'industrie et la recherche, est réalisée de diverses façons : avec des accéléromètres intrusifs, grâce à des vibromètres laser pour des mesures uniquement point par point, par le biais de l'interférométrie ou de l'holographie. La démarche est souvent lourde à mettre en œuvre et/ou limitée aux phénomènes stationnaires.

La technique proposée ici s'appuie sur la stéréovision, avec des mesures plein champ dynamiques. La démarche vise à terme la mesure de phénomènes transitoires pour des vibrations de structures, de plaques, de haut-parleurs, d'instruments de musique...

Afin de pouvoir mesurer sa forme en trois dimensions, deux images d'un objet, prises depuis deux points de vue différents, sont nécessaires. En associant des points localisés sur la première et la seconde image, et en connaissant les caractéristiques des caméras ainsi que leurs positions et leurs orientations, il est possible d'effectuer une triangulation et ainsi de retrouver la forme en trois dimensions de l'objet mesuré. Si les images sont prises à une cadence suffisamment élevée, grâce à des caméras ultra-rapides, il est alors possible

de suivre l'évolution temporelle de la position d'un point. Néanmoins, les caméras ultra-rapides coûtent cher et la synchronisation peut s'avérer difficile à mettre en œuvre.

L'idée étudiée ici est d'utiliser une caméra unique ainsi qu'un jeu de miroirs, générant ainsi deux caméras virtuelles pour capturer simultanément deux points de vue, utilisés ensuite pour reconstituer le déplacement des points de l'objet. Les coûts en sont d'autant diminués, tout en évitant les problèmes de synchronisation.

La mesure nécessite plusieurs étapes : l'étalonnage du capteur (la caméra) et la calibration du système (caméra et miroirs), l'enregistrement des images, la détection des points d'intérêt sur chaque image et le post-traitement des données. L'étalonnage et la calibration sont nécessaires afin d'obtenir une reconstruction dite « métrique » de l'objet mesuré. Elle est effectuée avec des outils de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur. La détection des points d'intérêt permet de suivre leur position au cours du temps, et le post-traitement utilise cette étape pour obtenir la mesure de vibration. De plus, une étape de filtrage numérique permet d'améliorer la précision de la mesure. Finalement, sera abordée la détermination de la précision de la mesure afin d'en déterminer les applications directes.

# Conférence - Acoustique et applications navales

François Reynard a travaillé depuis le début de sa carrière dans le management de la R&D au sein du Ministère de la Défense et depuis 2003 au sein de DCNS.

Il a œuvré 20 ans dans la détection sous-marine, pour les bâtiments de surface et pour les sous-marins, sur de la R&D ainsi que sur les programmes FREMM, Barracuda et SNLE de 3ème Génération.

Après un passage comme Architecte Système de Combat pour bâtiments de surface, il est en charge, depuis 2016, du département acoustique de DCNS Research.

---

Présentation des applications acoustiques, vibro-acoustiques et bruits au sein du groupe DCNS, un leader mondial du naval de défense et un innovateur dans le monde des Energies Marines Renouvelables.

Les enjeux de ces domaines techniques pour les navires militaires (bâtiments de surface, sous-marins, torpilles et drones) ainsi que pour les systèmes d’Energie Marine Renouvelable seront abordés.

Enfin, la prise en compte de la performance acoustique dans la conception montrera l’importance d’une démarche transverse à l’ensemble du navire pour obtenir la performance attendue.

# 3 Session 3

## 3.1 Identification de la pression pariétale turbulente dans les domaines naval et aéronautique

O. Grosset<sup>1,2</sup>, C. Pezerat<sup>2</sup>, J.-H. Thomas<sup>2</sup>, F. Ablitzer<sup>2</sup>

1. *IRT Jules Verne, Bouguenais*

2. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

L'étude des bruits aéroacoustique et hydroacoustique fait l'objet d'une forte demande industrielle en matière de recherche. En effet, dans le domaine des transports (routier, aérien, maritime...), l'écoulement du fluide sur le véhicule (écoulement turbulent) s'avère être une source de nuisance sonore non négligeable. La compréhension de ce type d'excitation est donc nécessaire pour minimiser leur impact. Ce type d'excitation correspond aux turbulences générées par la présence d'un obstacle (écoulement décollé) ou d'une couche limite turbulente à proximité de la paroi.

Ces turbulences entraînent, d'une part, des fluctuations de pression à proximité de la paroi appelées partie convective de l'excitation, et d'autre part, génèrent des ondes acoustiques dans toutes les directions correspondant à la partie acoustique de l'excitation. La composante acoustique est d'amplitude très inférieure à celle de la partie convective, donc très difficile à mesurer. Cependant, selon le domaine d'application, elle peut être la principale cause du rayonnement acoustique de la paroi.

Afin d'identifier les efforts excitant la structure, des méthodes inverses vibratoires sont utilisées telle que la méthode RIFF (Résolution Inverse Filtrée Fenêtrée). Cette méthode permet d'identifier localement un effort appliqué à une structure à partir du champ de vibrations. Dans cette présentation, la potentialité de la méthode pour les domaines naval et aéronautique est mise en avant à partir de simulations. Dans le cas du domaine naval, on montrera comment prendre en compte les effets de couplage fluide-structure et la possibilité d'isoler la composante acoustique de l'excitation. Dans le

cas du domaine aéronautique, on montrera comment prendre en compte une vitesse d'écoulement élevée et on verra que la méthode RIFF offre la possibilité de mesurer les pressions pariétales fluctuantes sans instrumentation de microphones affleurants à l'extérieur de la structure.

## **3.2 Identification modale en temps réel d'une poutre encastrée libre en vibration à l'aide de filtres de Kalman et de caméras rapides**

A. Goeller<sup>1</sup>, J.-L. Dion<sup>1</sup>, R. Le Breton<sup>1</sup>, T. Soriano<sup>1</sup>, B. Roux<sup>2</sup>

1. *Laboratoire QUARTZ, Supmeca, Saint-Ouen*

2. *Vannier-Kinoptik, Antony*

L'utilisation de mesures de champs et plus spécifiquement de mesures à l'aide de caméras rapides se généralise dans le domaine des vibrations avec un intérêt majeur : l'utilisation de capteurs logiciels pour transformer la camera en un véritable « capteur intelligent ».

Dans ce contexte, les travaux présentés proposent d'utiliser un modèle dynamique non linéaire et des techniques de vision pour identifier des paramètres cachés à l'aide d'une mesure sans contact. Cette identification se fait selon un schéma temps réel en utilisant des filtres de Kalman qui permettent également d'effectuer une prédiction sur l'état futur conservant le sens physique du modèle.

Le concept est présenté ici sur un cas d'application usuel : une poutre encastrée libre en excitation transitoire. Le but de ces travaux est de prouver la faisabilité de l'estimation de paramètres en temps réel tout en affichant les informations du modèle dans un cadre de réalité augmentée interactif.

### 3.3 Caractérisation du rayonnement acoustique d'un haut-parleur monté sur une barre de son : comparaison entre mesures, méthode d'éléments finis de surface et modèle sphéroïdal analytique

V. Roggerone<sup>1</sup>, E. Corteel<sup>2</sup>, X. Boutillon<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique des Solides, Palaiseau*

2. *Sonic Emotion Labs, Paris*

Les barres de son sont de plus en plus utilisées comme système de reproduction spatialisée. La qualité de la restitution sonore a l'avantage d'être moins dépendante de son placement dans l'espace qu'un système audio surround classique. En revanche, leur forme allongée, comparée à une enceinte standard, implique une signature acoustique et une directivité inhabituelle. L'étude de ces caractéristiques de rayonnement s'avèrent donc indispensable pour optimiser l'exploitation des barres de son. Cette étude se concentre sur l'influence de la forme de la barre de son.

On compare en premier lieu la directivité mesurée dans le plan horizontal avec celle prédite par un modèle numérique entre 200Hz et 2500Hz. Dans ce domaine fréquentiel, on peut adopter l'approximation du piston plan en considérant une distribution de vitesse uniforme sur la surface du haut-parleur. Les diagrammes de directivité sont normalisés pour s'affranchir de la fonction de transfert électromécanique des haut-parleurs. La simulation numérique s'appuie sur une méthode d'éléments finis de surface. Les figures de directivité sont interprétées en termes d'interférence du champ direct avec des sources secondaires localisées sur les arêtes de l'enceinte. La comparaison montre de faibles différences, que nous attribuons aux défauts de la mesure. La simulation numérique est considérée par la suite comme fiable pour prédire l'influence de la géométrie de l'enceinte sur le rayonnement dans toutes les directions de l'espace.

On considère ensuite un modèle analytique basé sur la résolution de l'équa-

tion de Helmholtz dans une géométrie sphéroïdale oblongue, bien adaptée à la description de la forme allongée d'une barre de son. Entre 1971 et 2007, Van Buren et Boisvert ont proposé une série d'articles donnant la solution au problème d'un piston rectangulaire vibrant sur une enceinte rigide sphéroïdale ainsi qu'un programme pour calculer la base de fonctions associées. Une solution pour un piston circulaire est donnée. On propose également une méthode pour choisir les dimensions du sphéroïde en fonction de la géométrie de l'enceinte. Enfin, on donne un critère de convergence sur l'ordre des fonctions d'onde à atteindre pour une estimation correcte de la solution. On compare ce modèle analytique aux résultats de la simulation numérique au moyen de deux indices classiques : l'index de directivité et la réponse en fréquence dans l'axe. Une paramétrisation du rayonnement acoustique est également proposée et utilisée.

Ces comparaisons montrent une bonne correspondance en basse fréquence, qui disparaît lorsque la fréquence augmente. On explique cet effet par le fait que les sources secondaires sont localisées différemment dans l'espace selon la géométrie de l'enceinte. Ces effets d'interférences sont moins prononcés avec une géométrie courbe (ici : un sphéroïde) que pour une enceinte parallélépipédique, ce qui nous amène à conclure sur l'intérêt d'un tel design pour une barre de son par rapport aux designs rectangulaires.

Étude faite dans le cadre du projet ANR-13-CORD-0008-EDISON-3D.

### **3.4 Enabling road noise engineering methods to model complex objects**

M. Kamrath<sup>1</sup>, J. Picaut<sup>2</sup>, P. Jean<sup>1</sup>

1. *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Saint Martin d'Hères*

2. *Laboratoire d'Acoustique Environnementale (IFSTTAR/AME/LAE), Bouguenais*

Cities populations have higher rates of annoyance, sleep disturbance, and other negative health outcomes due excessive transportation noise exposure. More accurately modeling urban sound propagation would help city plan-

ners mitigate the overall noise level but is difficult to accomplish because cities often have complicated geometries and large domains (compared to a wavelength). Engineering methods (e.g. Nord2000 and CNOSSOS) give very efficient approximations for simple geometries but do not allow complicated geometries, which commonly exist in cities. Furthermore, detailed methods (e.g. the boundary and finite elements element methods) provide precise results for complex geometries but are prohibitively expensive for this application (i.e. multiple city blocks up to the 4 kHz octave band).

However, a hybrid method combining an engineering method and the boundary element method can approximate sound propagation for urban settings including large complicated domains. This hybrid approach incorporates complex geometries by adding an extra attenuation term to the engineering method's other terms (e.g. geometrical spreading and atmospheric absorption). Subtracting two boundary element computations (i.e. complex case minus reference case) for a range of source/receiver positions and frequencies yields a table of correction factors. Interpolating this table of correction factors at the correct source/receiver position produces the additional attenuation term.

This hybrid method is less expensive than the boundary element method because the hybrid method reformulates the 3D problem as a 2.5D problem where only the complex object's parameter must be discretized. For a T-barrier, this hybrid method agrees very well with reference boundary element results with differences stemming from interpolating a finite data set. For a T-barrier with buildings, the hybrid method agrees moderately well but has additional differences due to summing the contributions differently. The boundary element method includes the phase information (i.e. a coherent sum) whereas the hybrid method neglects the phase information (i.e. an incoherent sum) like the engineering method. In conclusion, this hybrid method can model sound propagation for large domains that contain complex objects.

## 3.5 Continuation de solutions quasi-périodiques

P. Vigué<sup>1</sup>, L. Guillot<sup>2</sup>, C. Vergez<sup>1</sup>, B. Cochelin<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille*

2. *École Normale Supérieure de Cachan*

Un système non linéaire peut avoir des solutions périodiques évoluant selon les paramètres du système. L'étude de cette évolution des solutions (continuation) a un intérêt particulier en acoustique musicale, de nombreux instruments reposant sur l'excitation d'un système non linéaire dont le musicien contrôle certains paramètres. Les solutions périodiques peuvent être cherchées sous forme de séries de Fourier tronquées (méthode de l'Équilibrage Harmonique) ; la période est une des inconnues. Plusieurs solutions stables peuvent être mises en évidence par la continuation pour les mêmes paramètres de jeu, illustrant la dépendance aux conditions initiales. La méthode donne aussi accès aux solutions instables des modèles. Un défi important concerne la recherche des solutions quasi-périodiques à deux fréquences incommensurables (aussi appelés « sons multiphoniques » par les musiciens).

En utilisant la Méthode Asymptotique Numérique, méthode de continuation robuste, et en représentant les solutions par des séries doubles de Fourier, nous avons développé une méthode de continuation de ces solutions. Celle-ci se comporte bien même en situation d'accrochage périodique. De plus, les produits de variables sont traités par convolution des séries de Fourier, sans aller-retour dans le domaine temporel. Ceci permet d'accélérer les calculs préliminaires à chaque pas de continuation.

La méthode a été testée sur un modèle réduit d'instrument à anche (système autonome) comme sur un oscillateur forcé.

## 3.6 Atténuation des vibrations dans des structures creuses par ajout de matériaux granulaires

A. Sternberger<sup>1,2</sup>, J.-M. Génevaux<sup>2</sup>, A. Pelat<sup>2</sup>

1. *IRT Jules Verne, Bougenais*

2. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

L'allègement des structures devient un enjeu de plus en plus important dans l'industrie du transport. Cet allègement, couplé à une volonté de l'industrie de garder une puissance machine égale entraîne une augmentation des niveaux vibratoires. Certaines méthodes de réduction des vibrations sont usuellement appliquées comme l'alourdissement de zones ciblées où l'utilisation de matériaux viscoélastiques permettant la dissipation de l'énergie vibratoire. Dans le premier cas cette augmentation locale de masse va à l'encontre de l'objectif de réduction de la masse totale de la structure. Un matériau viscoélastique est efficace dans une gamme d'utilisation restreinte (dépendant de la température principalement). L'utilisation d'un matériau granulaire permet de s'affranchir de ces conditions climatiques, le matériau granulaire étant fait de verre dans le cas présenté.

Un matériau granulaire dissipe l'énergie vibratoire d'une structure primaire lorsque celle-ci est suffisamment mise en vibration. En effet, pour dissiper, les grains doivent être mis en mouvement relatifs les uns par rapport aux autres. Si la vibration induite est trop faible, la masse de grains utilisée se comporte comme une masse indéformable ce qui apporte un intérêt moindre de ce type de traitement. Lorsque les grains sont confinés dans une cavité de structure légère creuse, le niveau de dissipation dépend de l'amplitude d'excitation du système. Les caractéristiques physiques des grains, les dimensions de la cavité, les conditions aux limites entre grains et cavité, le taux de remplissage du volume disponible par les grains, etc. doivent aussi être pris en compte.

La non-linéarité du matériau granulaire est ainsi exploitée pour atténuer les vibrations d'une structure. Afin d'identifier cette influence, le système résonant étudié expérimentalement est à un degré de liberté. L'étude pré-

sentée permet de mettre en évidence différentes conditions de mesures et leur effet sur l'amortissement du système résonant. Une série de premiers résultats montre l'intérêt de l'utilisation de matériau granulaire. L'amortissement du système, fonction du taux de remplissage et de l'accélération de la structure résonante, permet d'ajuster au mieux la quantité de matériau granulaire pour une excitation donnée et inversement. La connaissance des phénomènes physiques entraînant l'amortissement dessine la continuité de ce travail, nécessitant l'utilisation de la simulation numérique de grains.

### 3.7 Réduction du temps de calcul de l'analyse de sensibilité d'un système non linéaire

J. Larivière<sup>1</sup>, S. Cogan<sup>1</sup>, P. Green<sup>2</sup>, E. Foltête<sup>1</sup>, G. Ham-Livet<sup>3</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*
2. *University of Liverpool, Royaume-Uni*
3. *Alstom, Le Creusot*

Le prototypage virtuel peut faciliter la conception et l'homologation des véhicules ferroviaires dans le but d'assurer la sécurité et le confort des passagers. L'analyse de sensibilité s'est révélée être un outil essentiel de classement des paramètres influents pour réduire efficacement l'espace des paramètres de conception, avant la mise en place de procédures coûteuses de sélection de modèle telles que l'optimisation, le recalage ou l'amélioration des éléments critiques du modèle. En parallèle, les temps de calcul importants nécessaires à la réalisation d'une analyse de sensibilité globale sur les simulations de phénomènes transitoires non-linéaires utilisées dans l'industrie ferroviaire peuvent s'avérer être un défi de taille. Les travaux présentés étudient la possibilité de remplacer ces simulations non linéaires par une série d'analyses modales équivalentes à différents points de linéarisation de l'espace de conception. Le travail est illustré par l'utilisation de la méthode d'analyse de sensibilité de Morris sur un exemple académique, l'oscillateur de Duffing, comportant une raideur non-linéaire. Les résultats d'une analyse de sensibilité non-linéaire complète sont comparés à ceux obtenus avec une analyse linéaire équivalente.

## 3.8 Analyse de sensibilité globale pour la prédiction du bruit de passage des véhicules automobiles

H. Hamdad<sup>1,2,3</sup>, C. Pezerat<sup>2</sup>, B. Gauvreau<sup>3</sup>

1. *Renault Technocentre, Guyancourt*

2. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

3. *Laboratoire d'Acoustique Environnementale (IFSTTAR/AME/LAE), Bouguenais*

Actuellement, pour commercialiser un véhicule, les constructeurs doivent se soumettre à un test d'homologation en bruit extérieur. Le règlement ECE R51-03, spécifie les niveaux admissibles que peut rayonner un véhicule automobile en roulage. Ce règlement est appliqué depuis le 1er juillet 2016 (Changement de méthode d'essai et sévérisation des niveaux admissibles). La diminution drastique des niveaux sonores se fera en 3 étapes : passage de 72 dB(A) actuellement à 68 dB(A) en 2024. Ce niveau de bruit est équivalent aux voitures électriques d'aujourd'hui. Les mesures suivant le règlement R51-03 réalisées dans un cadre officiel, ont montré que 97% des véhicules français ne respectaient pas les 68 dB(A) à terme du futur règlement.

Plusieurs outils pour calculer les fonctions de transfert à 7,50m selon la gamme de fréquence étudiée sont disponibles. En effet, des méthodes type éléments finis sont utilisées en basse fréquence, et des méthodes type lancer de faisceaux et radiosité en haute fréquence. Deux outils de synthèse pour la prévision du bruit de passage des véhicules sont disponibles. Les deux permettent de combiner le débit acoustique des sources avec les fonctions de transferts adéquates.

Cependant, ces modèles ont une précision encore insuffisante aujourd'hui pour prédire, à coup sûr, le niveau de bruit d'un véhicule en phase projet. La thèse consiste précisément à traiter cet inconvénient, et à développer une aide à la modélisation total du bruit de passage d'un véhicule à 7,50m, comme le préconisent les essais réglementaires. Le but est de prédire et d'évaluer avec précision ce bruit plus tôt dans le cycle de développement véhicule, i.e. avant l'étape d'industrialisation.

Dans cette présentation, le modèle de synthèse global est mis en avant. Il utilise des données en valeurs globales pour calculer le bruit de passage du véhicule à 7,50m. Les paramètres d'entrée du modèle sont définis et des lois de probabilité sur leur incertitude leur sont attribuées. Une propagation d'incertitudes dans le modèle est réalisée, en utilisant des tirages aléatoires de type Monte-Carlo. Les indices de sensibilité de Sobol ainsi que les indices SRC (Standardized Regression Coefficient) sont ensuite estimés, pour évaluer la variabilité de la sortie induite par l'incertitude des données d'entrée.

### **3.9 Étude de phénomènes d'instabilités à l'origine du crissement des courroies poly-V en atmosphère humide**

S. Gatignol<sup>1,2</sup>, T. Demassougne<sup>1</sup>, A. Le Bot<sup>2</sup>

1. *Hutchinson SNC, Joué-lès-Tours*

2. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Écully*

La réduction du niveau sonore global émis par les véhicules automobiles, le niveau sonore admis est passé de 82dB à 74dB ces dernières années, a engendré l'émergence de bruits parasites peu perceptibles auparavant. Elmaïan en établit un panorama élargi, le cas du crissement des essuie-glaces a par exemple été étudié récemment.

Le bruit de crissement des courroies poly-V est un autre exemple; il apparaît dans les systèmes de transmission par courroies accessoires des automobiles. Les premières études ont permis la suppression du bruit dans un contact sec entre la poulie et la courroie et les études plus récentes se sont concentrées sur le bruit des courroies en conditions humides.

Les travaux présentés étudient les phénomènes physiques engendrant l'apparition du crissement des courroies poly-V des automobiles en présence d'humidité et s'intéresse en particulier à la participation de différents phénomènes d'instabilités de frottements. Un banc d'essais a été développé pour cette étude. Il reproduit le contact entre la courroie et la poulie du moteur,

la courroie est cependant maintenue statique. L'alimentation en eau est maîtrisée et la vitesse de glissement entre la poulie et la courroie et le coefficient de frottement instantané sont alors mesurés. L'instrumentation du banc autorise également l'enregistrement du son et la mesure des vibrations de la courroie par accélérométrie ou vibrométrie.

L'existence d'une zone de frottement statique à l'entrée de l'arc d'enroulement sur moteur n'est cependant pas reproduite. Les mesures réalisées ont permis d'évaluer l'implication de plusieurs phénomènes d'instabilités dans l'apparition du crissement. Les deux phénomènes qui ont été étudiés plus spécifiquement sont issus du même scénario mathématique : l'apparition d'un amortissement négatif lié à la décroissance du coefficient de frottement pour une vitesse de glissement croissante. Dans le premier cas, l'existence d'une pente importante de la courbe d'évolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement lié à l'apparition d'un régime mixte de lubrification a été recherchée. Un critère d'instabilité a été proposé et la correspondance avec l'apparition du bruit a été évaluée.

Dans un second temps, l'existence d'une phase de contact statique entre la poulie et la courroie a été observée par des essais de vibrométrie. Une modélisation simple du phénomène de Stick-Slip a été réalisée pour étudier notamment l'impact du revêtement des courroies.

### **3.10 Influence des structures internes non-axi-symétriques sur le comportement vibro-acoustique de coques raidies cylindriques immergées**

V. Meyer<sup>1,2</sup>, L. Maxit<sup>2</sup>, J.-L. Guyader<sup>2</sup>, C. Audoly<sup>1</sup>, Y. Renou<sup>1</sup>

1. *DCNS Research, Ollioules*

2. *Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA, Lyon*

De nombreux travaux dans la littérature se sont concentrés sur la modélisation vibro-acoustique de coques cylindriques raidies immergées, du fait des

nombreuses applications industrielles, en particulier dans le domaine aéronautique ou naval. Cependant, peu d'études prennent en compte des structures internes non-axisymétriques. En effet, des structures telles que des supports moteurs, des planchers ou des carlingages, peuvent avoir une influence importante sur le comportement vibro-acoustique du système. D'un côté, des modèles analytiques permettent d'inclure des plaques ou des systèmes masse-ressort dans une coque cylindrique raidie, mais ne correspondent pas bien aux besoins industriels. D'un autre côté, les méthodes de discrétisation, telle que la méthode des éléments finis par exemple, sont très bien adaptées pour rendre compte de la complexité géométrique mais sont limités à une gamme fréquentielle relativement basse au vu de la taille du système étudié et des capacités de calcul actuelles. Ces méthodes ne sont donc pas toujours adaptées à des phases de conception préliminaire. C'est pourquoi une méthode de sous-structuration baptisée CTF (Condensed Transfer Function) est développée. Elle vise à profiter des avantages respectifs des méthodes analytiques et des méthodes de discrétisation. L'un des objectifs est de pouvoir prendre en compte la complexité structurelle tout en étant capable de calculer les réponses à des fréquences plus hautes que les méthodes de discrétisation classiques. La méthode CTF est développée dans le cas général de deux structures minces couplées le long d'une ligne. Un ensemble de fonctions orthonormées, baptisées fonctions de condensation, est défini afin d'approximer les forces et déplacements à la jonction entre les sous-systèmes. Des fonctions de transfert condensées sont définies pour chaque sous-système découplé. L'utilisation du principe de superposition, de l'équilibre des forces et de la continuité des déplacements permet de déduire le comportement des sous-systèmes couplés. Dans le cas d'une coque cylindrique raidie immergée couplée à des structures internes non-axisymétriques, le système est décomposé en 3 familles de sous-systèmes : (1) la coque cylindrique, décrite semi-analytiquement par la résolution des équations de Flugge dans le domaine des nombres d'onde, (2) les structures axisymétriques décrites par des modèles éléments finis axisymétriques et (3) les structures non-axisymétriques décrites par des modèles éléments finis. La méthode CTF est appliquée à différents cas tests afin d'étudier

l'influence des structures internes non-axisymétriques sur le comportement vibro-acoustique d'une coque cylindrique pour différents types d'excitations pertinents dans le domaine naval. Tout d'abord, dans le cas d'une force ponctuelle, on observe que les structures internes non-axisymétriques modifient la répartition de l'énergie vibratoire sur la coque. On montre également qu'un plus grand nombre d'ordres circonférentiels intervient dans la réponse du système couplé aux structures internes non-axisymétriques. Ceci a pour effet d'augmenter l'efficacité de rayonnement. Dans le cas d'une coque immergée et excitée par une onde plane acoustique, on s'intéresse plus particulièrement à la pression diffractée par le système élastique. En plus des phénomènes de diffraction connus sur les structures raidies (Bragg, Bloch-Floquet), les simulations numériques mettent en évidence la propagation d'ondes dans les structures internes.

### **3.11 Synthèse d'un champ acoustique avec contraste spatial élevé**

M. Sanalati<sup>1,2,3</sup>, P. Herzog<sup>2</sup>, M. Melon<sup>1</sup>, J.-C Le Roux<sup>3</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille*

3. *Centre de Transfert de Technologie du Mans*

Le but de ce travail répond à une demande industrielle de contrôle d'un réseau de sources sonores pour générer un champ acoustique prédéfini et focalisé « in situ ». La problématique consiste alors à pouvoir modéliser une source acoustique avec un minimum de termes tout en conservant une précision importante. La connaissance de ce modèle permettra de construire par méthode inverse, le réseau correspondant aux contraintes.

Dans une étude récente, la simulation d'un problème inverse (reconstruction de la pression rayonnée par un transformateur en champ lointain à partir de mesures en champ proche) a montré que la technique de décomposition du champ acoustique en « modes de rayonnement » est une méthode prometteuse. L'approche consiste à mesurer la pression en des positions de points

arbitraires et à estimer l'ensemble des solutions indépendantes (« modes de rayonnement ») qui lient « le récepteur » et « l'émetteur » et permettent de décrire une déformée quelconque avec une précision suffisante en utilisant le nombre de termes minimal.

Ayant les potentialités demandées, cette méthode est en cours de validation. Elle est utilisée ici pour identifier le profil vibratoire d'un haut-parleur monté sur une enceinte close à partir de mesures de pression acoustique effectuées en chambre anéchoïque en un nombre restreint de points. Le calcul du champ rayonné (la réponse en fréquences et le diagramme de directivité) à partir de la vitesse identifiée est ensuite comparé aux mesures et au résultat du calcul par une méthode classique : calcul BEM (Boundary Element Method) effectué en utilisant les mesures de profil vibratoire de la membrane du haut-parleur mesuré avec un vibromètre laser. Un bon accord entre la méthode des « modes de rayonnement » et les mesures classiques est observé.

### **3.12 Séparation de sources acoustiques au passage d'un véhicule**

R. Cousson<sup>1,2</sup>, M.-A. Pallas<sup>1</sup>, Q. Leclère<sup>2</sup>, M. Bérengier<sup>1</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique Environnementale (IFSTTAR/AME/LAE), Bouguenais*

2. *INSA, Lyon*

La thèse s'inscrit dans un contexte d'étude d'impact environnemental du bruit du trafic routier. Les villes de plus de 100 000 habitants et les grandes infrastructures de transport sont tenues d'établir une cartographie de bruit à disposition du public. Pour cela, des modèles de prévision de bruit sont utilisés, et prennent en compte, entre autres, deux éléments importants : l'origine du bruit – son émission – et sa propagation qui considèrera notamment les configurations urbaines. La présente thèse se concentre sur l'émission du bruit et cherche à caractériser les sources de bruit des véhicules, afin de fournir le plus d'informations possibles pour affiner les modèles précités. L'objectif étant de s'approcher le plus possible de la réalité, la méthode de mesure

à développer doit donner des résultats fiables pour tous types de motorisations et pour tous types de fonctionnement (vitesse constante, accélération et décélération...) du véhicule en circulation en conditions réelles.

La méthode de référence pour l'identification de sources acoustiques est la Formation de Voies (FV) ou Beamforming (BF). Cette technique présente des limites bien connues de performance spatiale (séparation de sources proches ou géométriquement confondues) et quantitative (estimation de la contribution sonore de source), d'autant plus pénalisantes aux basses fréquences ou pour des sources de faible niveau en présence de sources fortes. Pour améliorer le résultat obtenu par la FV, il existe des méthodes dites de « déconvolution ». Toutefois, l'adaptation de ces méthodes à des sources mobiles est récente et s'est faite principalement à des échelles différentes du cas de la thèse (par exemple pour le bruit des avions). Par ailleurs, l'utilisation d'un signal de référence permet d'améliorer également la séparation de sources décorréées, mais le principe a uniquement été appliqué à des sources fixes. L'objectif de cette thèse est d'explorer ces méthodes et développer une approche adaptée au contexte de sources mobiles, afin de l'appliquer au cas de véhicules routiers. Un soin particulier sera apporté à la définition des limites d'utilisation de la méthode développée, afin d'avoir une évaluation de la validité et de la robustesse des résultats. Pour cela, la démarche suivie traite en premier lieu, par la simulation et par l'expérience, des cas simples et maîtrisés, avant d'aborder progressivement des sources plus complexes avec l'objectif final de parvenir au véhicule complet en conditions réelles d'utilisation. Un cas expérimental simple a été mis en œuvre pour tester les méthodes : il s'agit d'un pendule d'une longueur de 3 m, avec un dispositif à son extrémité, constitué de deux sources sonores écartées de 13 cm, pouvant générer deux signaux différents simultanément. En faisant l'hypothèse qu'au voisinage de la normale du pendule, le mouvement peut être considéré comme linéaire, la séparation des deux sources a été effectuée par FV classique sur sources mobiles et par une approche différente conduisant à une déconvolution en source mobile.

### 3.13 Influence des conditions de contact sur le crissement de frein

E. Denimal<sup>1,2</sup>, S. Nacivet<sup>2</sup>, L. Nechak<sup>1</sup>, J.-J. Sinou<sup>1,3,4</sup>

1. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Écully*
2. *PSA Peugeot-Citroën, La Garenne Colombes*
3. *CeLyA, Lyon*
4. *Institut Universitaire de France, Paris*

Même s'il n'affecte pas l'efficacité du freinage, le crissement de frein et les vibrations auto-entretenues associées sont des phénomènes indésirables puisqu'ils peuvent être à l'origine de nuisances sonores pour les passagers et représenter des coûts importants auprès du service client. Dans ce contexte, de nombreuses études sont dédiées à la prédiction du crissement. La méthode la plus employée consiste à faire une analyse de stabilité du système afin d'établir sa propension au crissement. Jusqu'à présent, la majorité des études menées ont montré l'influence prédominante du contact disque-plaquette sur la stabilité du système de freinage et donc sur la propension au crissement. Cependant, il s'avère que de nombreux autres contacts (entre le piston et les plaquettes, entre les plaquettes et l'étrier etc.) du système de frein ont un effet non négligeable sur la propension au crissement. Cette étude se penche sur ce point crucial. À partir d'un modèle éléments finis industriel d'un frein automobile, les effets des états de contact entre les différents composants sur la stabilité du système sont analysés. Pour cela, un ensemble de neuf interfaces de contact est retenu en plus de l'interface de contact entre les plaquettes et le disque. Ces neuf interfaces sont considérées comme glissantes ou frottantes.

Pour l'ensemble des configurations considérées, une analyse aux valeurs propres complexes est réalisée afin de déterminer les occurrences de crissement. Les résultats obtenus montrent une influence non-négligeable de la définition des interfaces de contact sur la stabilité du système de freinage. En effet, une large dispersion des résultats est observée en fonction des différentes configurations. Une conclusion importante peut alors être établie sur la nécessité de prendre en compte l'ensemble de ces états de contact pour la

prédiction du crissement de frein.

### 3.14 Contrôle passif avec un NES fortement non linéaire

V. Iurasov<sup>1</sup>, P.-O. Mattei<sup>1</sup>, M. Pachebat<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille*

Le but de notre recherche est l'application de l'idée du pompage énergétique à la vibroacoustique. On cherche ici à limiter, au moyen d'un absorbeur dynamique fortement non linéaire (« nonlinear energy sink » ou NES), la vibration et le champ acoustique rayonné par une plaque mince sous excitation acoustique.

Afin de contrôler les faibles niveaux vibratoires mis en jeu, on a introduit un nouveau type de NES. Sa non-linéarité, qui se traduit par un effet d'amollissement à faible niveau d'excitation, permet de considérablement abaisser le seuil de déclenchement du pompage énergétique. À plus fort niveau d'excitation, on peut observer un régime chaotique de l'absorbeur qui conduit à une nouvelle catégorie de pompage énergétique.

Nous rappellerons les premiers résultats des expériences qui ont montré l'efficacité du nouveau NES. Les résultats de la modélisation analytique de la dynamique linéaire du NES expliquent les effets observés dans les expériences et permettent de construire le modèle numérique complet. Les simulations numériques pour le NES seul ou le NES couplé à la plaque sont dans un bon accord avec les résultats expérimentaux. Nous montrons que le transfert d'énergie observé avec le nouveau NES en régime chaotique n'est pas le pompage énergétique dans le sens habituel : une partie d'énergie est retransférée par le NES et redissipée par tous les modes du système primaire.

# 4 Session 4

## 4.1 Impact de la compression uni-axiale sur l'acoustique d'une couche poreuse

L. Lei<sup>1</sup>, N. Dauchez<sup>1</sup>, J.-D. Chazot<sup>1</sup>

1. *Laboratoire Roberval, UTC, Compiègne*

Ce travail, réalisé dans le cadre du projet FUI ECOBEX, consiste à réduire le bruit au passage des véhicules en jouant sur les écrans acoustiques sous capot moteur. Typiquement, un abaissement du niveau de bruit de 72 dBA à 68 dBA est visé d'ici 2024.

Les écrans sont constitués de matériaux poreux thermo-compressés. Ce processus de mise en forme modifie fortement les propriétés d'absorption et d'isolation acoustique des matériaux. Dans ce travail, nous étudions des fibreux et des mousses thermo-compressés à fort taux de compression ( $n > 4$ ). Des mesures de résistivité au passage de l'air et du module d'Young dans la direction de compression sont effectués. Des lois analytiques sont proposées pour prédire la variation de ces paramètres au cours de la compression. Elles prennent en compte les changements morphologiques à échelle microscopique. Un bon accord est obtenu entre mesure et modèle pour la plupart des matériaux. On montre enfin comment la thermo-compression modifie le comportement acoustique d'un écran en absorption et en isolation.

## 4.2 Conception de panneaux non résonants basés sur l'utilisation de réseaux périodiques de trous noirs acoustiques

O. Aklouche<sup>1,2</sup>, A. Pelat<sup>2</sup>, S. Maugeais<sup>3</sup>, F. Gautier<sup>2</sup>

1. *IRT Jules Verne, Bouguenais*

2. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

3. *Laboratoire Manceau de Mathématiques, Le Mans*

Le trou noir acoustique est un moyen passif, qui peut être utilisé pour la réduction des vibrations de structures sans ajout de masse. Un trou noir (TN) aménagé sur la structure est un piège à ondes vibratoires, induit par une diminution locale d'épaisseur. Dans une plaque, un tel TN est une cuvette dont l'épaisseur dans la région centrale est particulièrement faible. Un film viscoélastique, également de faible épaisseur, placé au centre, crée un amortissement local non uniforme à l'origine de la réduction des niveaux vibratoires. Ce mécanisme localisé est particulièrement efficace du fait de la forte activité vibratoire dans cette région. Le TN étant un diffuseur pénétrable, il présente également un comportement résonant à basses fréquences en plus de son comportement fortement amortissant à hautes fréquences. Ces propriétés peuvent être combinées pour concevoir des structures non résonantes dans de basses bandes fréquentielles.

En effet, un agencement périodique de plusieurs trous noirs sur une plaque permet de créer des bandes de fréquence interdites de Bragg et de résonance dans lesquelles les ondes de flexion ne se propagent pas. Dans une telle structure, appelée méta-plaque, les vibrations sont amorties dans la zone des hautes fréquences par le cumul d'effet trou noir, et à basses fréquences par les bandes interdites générées par la périodicité du milieu et les résonances des trous noirs.

Ce travail porte sur la caractérisation expérimentale d'un démonstrateur de méta-plaque de dimensions 1050 x 1750 x 5 mm, contenant 15 TNs disposés de manière périodique. Chaque TN a un diamètre de 175 mm et est placé au centre d'une cellule carrée de 350 mm de côté. La conception et le dimensionnement du démonstrateur s'appuient sur des études théoriques et numériques d'un TN isolé, se basant sur l'analyse des caractéristiques de diffusion de ce dernier. À l'issue de ce dimensionnement, des mesures de mobilité vibratoire montrent l'existence de plusieurs bandes interdites basses fréquences (ex : [80 - 100] Hz, [165 - 193] Hz et [273 - 297] Hz), dont la largeur et la position peuvent être contrôlées par les caractéristiques physiques et géométriques du TN.

## 4.3 Evaluation des paramètres microstructuraux dominant le comportement vibratoire d'un carter d'huile en polymère à fibres courtes

M. Zerrad<sup>1,2</sup>, N. Totaro<sup>1</sup>, R. G. Rinaldi<sup>3</sup>, B. Eller<sup>2</sup>

1. *Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA, Lyon*
2. *Renault*
3. *INSA, Lyon*

Dans le but de concevoir des véhicules moins polluants, les constructeurs automobiles favorisent entre autres l'allégement des structures. Dans ce sens, les ingénieurs motoristes préconisent le remplacement des matériaux métalliques de pièces véhicules ou moteur par des composites à matrice polymère.

Cependant, les techniques de simulations numériques qui permettent d'évaluer les performances vibratoires de ces matériaux ne se montrent pas suffisamment efficaces et robustes et mènent à des corrélations calcul/essai non satisfaisantes. En effet, les paramètres à considérer pour améliorer la modélisation numérique de ce type de matériau sont multiples. Plus précisément, le module d'Young et l'amortissement dépendent notamment de la température, de l'humidité et de la fréquence de sollicitation. De plus, l'orientation des charges ainsi que leur distribution modifient le comportement mécanique des pièces. Pour illustrer ces variabilités, l'impact de la température et de l'hygrométrie sur le comportement vibratoire de la structure – dans notre cas un carter d'huile en PA6-GF35 (polyamide 6 chargé à 35% en fibres de verre) – a été investigué par des mesures de fonctions de transferts. Les conclusions obtenues sur la base de l'analyse du comportement vibratoire de pièces réalisées en PA6GF35 ont été confrontées à la caractérisation des propriétés viscoélastique du matériau par DMA (Dynamic Mechanical Analysis) et microstructurale par tomographie aux rayons X. Ces analyses permettent ainsi de hiérarchiser les paramètres influant sur le comportement du matériau et ainsi de proposer des modèles numériques « justes nécessaires » à la représentation macroscopique du comportement vibratoire de ce type de pièce.

## 4.4 Etude expérimentale du comportement dynamique non-linéaire d'un assemblage

P. Butaud<sup>1</sup>, G. Chevallier<sup>1</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*

La problématique de l'allègement des structures est présente dans de nombreux secteurs industriels en France et dans le monde. Les évolutions technologiques associées soulèvent des challenges scientifiques liés entre autre au comportement vibratoire des nouvelles structures envisagées. En effet leur faible masse, associée à leur rigidité élevée et à leur amortissement faible, induit un comportement vibratoire et acoustique qui est souvent moins satisfaisant que celui des structures plus classiques. De nombreuses solutions permettent de limiter les vibrations grâce à l'utilisation de matériaux polymères, qui permettent la dissipation de l'énergie de déformation. Cependant, dans le cas des applications spatiales et aérospatiales, les températures sont trop basses pour espérer une réduction significative du niveau vibratoire par effet viscoélastique. Les systèmes actifs ou semi-actifs utilisant des matériaux piézo-électriques sont eux, plus efficaces dans ce type d'environnement, mais induisent une certaine consommation d'énergie. Le frottement sec est une solution amortissante envisageable, elle est en effet moins efficiente mais n'est pas tributaire de la température et est énergétiquement passive. Cependant son efficacité dépend de l'amplitude des vibrations ainsi que de la force de serrage appliquée à l'assemblage boulonné. Cette non-linéarité pourrait être exploitée afin de piloter l'amortissement. L'amortissement serait alors réglable via la force de serrage des vis. L'objectif de nos travaux est d'évaluer l'efficacité du contrôle des assemblages boulonnés pour la réduction de niveaux vibratoires. Pour cela nous présentons une campagne d'essais qui met en avant les paramètres optimaux pour un contrôle vibratoire fiable, en fonction de la fréquence et de l'amplitude de l'excitation, sur une structure assemblée.

## 4.5 Homogénéisation périodique de plaques raidies à résonances internes

P. Fossat<sup>1,2</sup>, C. Boutin<sup>2,3</sup>, M. Ichchou<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Écully*

2. *ENTPE - Laboratoire Génie Civil Bâtiment, Vaulx-en-Velin*

3. *CeLyA, Lyon*

Ce travail présente le comportement dynamique d'une plaque raidie par des poutres. Le comportement d'une cellule unitaire constituée d'une poutre couplée à une plaque est étudié par homogénéisation suivant une analyse asymptotique multi-échelle pour construire les équations du comportement mécanique effectif. Cette méthode permet une représentation pertinente des mécanismes de flexion mis en jeu aux échelles locale et globale. Un modèle analytique en flexion est obtenu à partir des équations de l'élasticité linéaire appliquées à une poutre couplée à une plaque. La résolution du problème dans le domaine fréquentiel mène aux équations de dispersion et met en évidence les bandes interdites associées à la structure. Ce modèle permet d'identifier les paramètres favorables à la résonance interne en fonction des contrastes géométriques et mécaniques entre les constituants de la cellule. Ce modèle est ensuite étendu à une plaque bi-raïdie et le couplage de la plaque avec le grillage de poutres rend possible l'estimation des paramètres géométriques et mécaniques compatibles avec une dynamique locale. La validité et la faisabilité du modèle est vérifiée en comparant les prédictions théoriques avec des simulations numériques (FEM/WFEM). Cette approche peut être utilisée pour décrire le mouvement de panneaux raidis industriels, ou comme modèle de conception pour des structures ayant des caractéristiques spécifiques à certaines fréquences.

## 4.6 Caractérisation et modélisation des liaisons mécaniques dans les systèmes simple- et double-ossature du bâtiment

F. Marchetti<sup>1,2</sup>, F. Chevillotte<sup>2</sup>

1. *Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA, Lyon*

2. *Matelys, Vaulx-en-Velin*

Les constructions traditionnelles comportent des cloisons à simple ossature (plaque-montant-plaque). Les nouveaux modes de construction (construction bois) ou de rénovation (isolation par l'extérieur) font apparaître des systèmes plus complexes avec des ossatures multiples et des multicouches à la place de simple plaque.

Les systèmes traditionnels (simple ossature et plaques) ont déjà été largement étudiés, mesurés et simulés. Les modèles existants sont assez robustes pour simuler les cloisons traditionnelles mais ne sont pas adaptés aux nouveaux systèmes constructifs. En effet, ces modèles ne considèrent qu'un seul montant et des plaques minces de part et d'autre. Au cours de mon stage de recherche j'ai étudié ces nouveaux systèmes en divisant mon travail en deux parties :

1. l'amélioration du modèle à simple ossature déjà existant pour prendre en compte les multicouches.
2. étendre ce modèle vers un système à double ossature.

Dans un premier temps, les multicouches ont été assimilés à des plaques minces avec des paramètres équivalents. Puis, nous avons proposé une méthode pour lever l'hypothèse de plaque mince en utilisant notamment la résolution dans l'espace des nombres d'onde et ainsi prendre en compte les multicouches des cloisons du bâtiment. Dans un second temps, nous avons proposé une généralisation de l'approche aux systèmes à double ossature où nous avons utilisé la condensation de matrices de transfert en force/vitesse. De plus, nous avons aussi étudié l'influence des chemins vibratoires croisés

sur un système double montant, c'est-à-dire un chemin aérien puis solidien ou inversement.

Finalement, les résultats suivants ont été obtenus :

- Plusieurs méthodes de condensation de multicouches ont été proposées et implémentées.
- Un modèle de montant s'affranchissant de l'hypothèse de plaque mince a été développé et intégré dans un logiciel commercial. Les résultats ont été comparés au modèle existant et aux mesures disponibles.
- Enfin une modélisation de système à double ossature a été proposée. Une estimation de l'influence des chemins vibratoire croisés a été faite.

Ces travaux ont été menés lors d'un stage de recherche chez Matelys. Dans la continuité de ce stage, ma thèse de doctorat (2016-2019) porte sur la caractérisation vibro-acoustique en large bande de matériau orthotrope, multicouche, et structure raidie.

## 4.7 Contrôle actif/passif de salle anéchoïque

C. Pinhede<sup>1</sup>, D. Habault<sup>1</sup>, E. Friot<sup>1</sup>, P. Herzog<sup>1</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille*

Depuis plusieurs années, se développe un intérêt croissant pour la caractérisation des sources basses fréquences qui sont de plus en plus répandues notamment dans les zones urbaines. L'analyse du rayonnement de ces sources doit souvent être réalisée dans une salle anéchoïque afin de les isoler de leur environnement. Or, toutes ces salles possèdent une fréquence de coupure, souvent entre 80 et 100 Hz, en dessous de laquelle les mesures ne sont plus anéchoïques. Une autre difficulté des mesures en basses fréquences est due aux dimensions des salles anéchoïques qui imposent de travailler en champ proche. L'approche présentée consiste à tirer parti de la complémentarité entre les matériaux absorbants et les techniques de contrôle actif de bruit, qui ont de très bonnes performances dans les basses fréquences. Ceci permet de concevoir des solutions hybrides combinant une couche absorbante et un

ensemble de microphones-sources-contrôleurs. Cette technique est centrée sur le critère d'anéchoïcité, et non d'absorption, afin de respecter la forme spatiale des fronts d'ondes. Elle consiste à contrôler la pression diffractée par les parois de la salle. Nous présenterons des résultats de simulation de contrôle actif du champ diffracté et des résultats expérimentaux obtenus pour diverses configurations de salle anéchoïque (échelle réduite et échelle 1). L'objectif de cette présentation est de comparer les performances d'une mesure normalisée entre une salle anéchoïque classique et une salle équipée d'un système de contrôle actif.

## 4.8 Synthèse d'impédance acoustique distribuée

G. Matten<sup>1</sup>, M. Ouisse<sup>1</sup>, M. Collet<sup>2</sup>, S. Karkar<sup>2</sup>, H. Lissek<sup>3</sup>, R. Boulandet<sup>3</sup>, M. Versaevel<sup>4</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*
2. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Écullly*
3. *Signal Processing Laboratory 2 (LTS2), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)*
4. *Safran Nacelles, Gonfreville L'Orcher*

Dans le contexte de la réduction des nuisances sonores générées par l'aviation civile due au bruit généré par les réacteurs, une des solutions envisagées réside dans l'utilisation d'un revêtement actif permettant de diminuer la propagation des ondes sonores dans la nacelle du réacteur. Le contrôle de l'impédance acoustique, c'est-à-dire de la dynamique pression/vitesse de l'air au niveau de la surface contrôlée, a pour conséquence une réduction significative de l'énergie transmise le long de la surface traitée. Ce contrôle est réalisé par une distribution de hauts parleurs (action sur le champ de vitesse) et de microphones (mesure du champ de pression). Il est donc nécessaire de pouvoir imposer le courant électrique circulant dans la bobine des haut-parleurs, calculé par un filtre à réponse impulsionnelle infinie (IIR), en fonction de la pression mesurée. Le système présenté ici permet de contrôler simultanément trente cellules actives de hauts-parleurs. L'architecture du système permet en outre de modifier en temps réel la dynamique de chaque filtre implémenté.

La programmation de l'impédance acoustique imposée localement sur la surface active permet ainsi une mise en œuvre aisée de différentes stratégies de contrôle.

## 4.9 Optimisation d'un système de son 3D léger en salle d'écoute usuelle

A. Vidal<sup>1,2</sup>, P. Herzog<sup>2</sup>, C. Lambourg<sup>1</sup>

1. *Genesis, Aix-en-Provence*

2. *Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Marseille*

L'objectif de ces travaux est la réalisation d'un dispositif de restitution sonore léger en salle usuelle et fidèle à la réalité. La fidélité de la restitution concerne la spatialisation du son ainsi que la conservation du timbre (pas de « coloration » du rendu). Dans notre approche, nous visons les meilleures performances en termes de respect du timbre, la précision en localisation étant secondaire. L'utilisation d'un casque d'écoute n'étant pas souhaitée, nos travaux se sont intéressés à la restitution spatialisée avec un dispositif de quelques haut-parleurs.

Pour limiter la coloration introduite par la salle d'écoute, nous proposons de placer les sources à proximité de l'auditeur, maximisant le rapport champ direct sur champ diffus. Ce placement inhabituel peut avoir des effets sur plusieurs aspects, parmi lesquels trois sont étudiés. Le premier concerne la diffraction d'une onde incidente par l'auditeur (les HRTF), et des mesures ont été réalisées à deux distances pour 4 mannequins et une sphère. Le deuxième concerne l'effet de salle en fonction de la distance d'écoute, ainsi que son égalisation. Enfin, le dernier concerne la robustesse au mauvais placement de l'auditeur. Des tests perceptifs ont été menés pour évaluer les effets de ces deux derniers aspects.

## 4.10 Accord non uniforme d'amortisseurs dynamiques multi modaux pour treillis périodiques

L. Rodrigues Cunha<sup>1</sup>, M. Ouisse<sup>1</sup>, D. A. Rade<sup>2</sup>

1. *FEMTO-ST, Besançon*

2. *Institut Technologique de l'Aéronautique (Brésil)*

Les structures périodiques ont des propriétés atypiques pour la propagation des ondes. Elles peuvent se comporter comme un filtre mécanique pour bloquer l'énergie dans des bandes de fréquences spécifiques. Cela s'explique, dans la plupart des cas, par des interférences d'ondes destructives provoquées par la réflexion et la transmission en raison des ruptures d'impédance périodiques. Ces bandes interdites de Bragg sont liées à la périodicité spatiale. Un amortisseur dynamique est un mécanisme qui, attaché à une structure principale, peut être accordé à une fréquence spécifique. Cela réduit considérablement l'amplitude de la réponse soumise à une excitation harmonique. Son principe de fonctionnement est basé sur l'ajout d'un nouveau degré de liberté en incorporant un système masse-ressort résonant. De façon périodique, ce mécanisme peut créer une bande interdite résonante. Un amortisseur dynamique multimodal peut également être utilisé pour agir sur plusieurs fréquences. Ces deux propriétés peuvent être combinées et plusieurs bandes interdites ajustables peuvent être créés.

Dans cette étude, un treillis 3D est modélisé par éléments finis de type poutre d'Euler Bernoulli et une direction de propagation est analysée. Une poutre 3D avec une masse ponctuelle est utilisée afin d'obtenir un absorbeur multimodal. Une analyse d'incertitude sur la position de cette masse, liée à la rigidité du ADV, est menée. Par conséquent, la valeur de la fréquence accordée change et l'enveloppe de l'intervalle de confiance des zones d'atténuation montre la possibilité d'obtenir des configurations plus favorables ou non. En d'autres termes, en exploitant les phénomènes de localisation, il est possible d'observer des zones d'atténuation plus larges ou plus étroites.

Les diagrammes de dispersion et les fonctions de réponse en fréquence sont

obtenues en utilisant le théorème de Floquet pour le modèle infini et 10 cellules unitaires sont utilisées pour le modèle fini, respectivement. La géométrie du treillis et les positions des ADV peuvent être adaptées pour améliorer les performances globales. Ensuite, le gradient des positions de masse pour les absorbeurs et différentes configurations sont étudiées et les résultats sont comparés. Enfin, les avantages et les inconvénients de ces implementations sont discutées.

## 4.11 Modélisation physique et synthèse sonore d'une guitare brésilienne

G. O. Paiva<sup>1,2</sup>, F. Gautier<sup>1</sup>, J. M. C. Dos Santos<sup>2</sup>, F. Ablitzer<sup>1</sup>

1. *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans*

2. *Université de Campinas (Brésil)*

Les guitares brésiennes sont à l'origine des instruments traditionnels joués dans différentes régions du Brésil, présentant plusieurs variations de caisse, de bois, de nombre de cordes et d'accordages. Ce travail porte sur la viola caipira (nomination brésilienne de guitare paysanne), étant le type le plus commun et ayant le rôle le plus substantiel dans la musique brésilienne traditionnelle. En général, la viola caipira est composée de dix cordes en acier, disposées en cinq paires couplées à la table d'harmonie à travers le chevalet, telle une guitare classique. Afin d'analyser l'interaction entre la caisse et les cordes de l'instrument, un modèle physique basé sur une approche hybride est développé ; des modes de caisse sont identifiés à partir de l'analyse modale de la mobilité mesurée sur le chevalet. Une méthode pour mesurer telle mobilité est présentée et étudiée dans ce propos. Elle est basée sur la dite « méthode du fil cassé » : il s'agit d'un mécanisme pour exciter les points où les cordes sont en contact avec le chevalet ; un fin fil de cuivre placé autour de la corde, très près du chevalet, est tiré dans la direction souhaitée, se cassant de manière soudaine et déclenchant une force sous forme d'une fonction Heaviside sur le point d'excitation. Ceci est une procédure à bas coût et potentiellement bien

adaptée aux ateliers de lutherie.

## 4.12 Détection, localisation et identification de sources acoustiques avec un capteur compact

A. Ramamonjy<sup>1</sup>, A. Garcia<sup>1</sup>, E. Bavu<sup>1</sup>, S. Hengy<sup>2</sup>

1. *Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés, CNAM, Paris*
2. *Acoustique et Protection du Combattant, Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis*

La détection multimodale (audio et vidéo) et multi-capteurs est étudiée au Laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés (Cnam-LMSSC) et à l'Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL). Le présent travail de thèse est consacré au développement d'une antenne microphonique miniature qui sera déployée en réseau pour former le sous-système acoustique du système global. Cette antenne, intelligente et autonome, pourra effectuer des tâches de détection, localisation, réduction de bruit et d'identification de sources acoustiques sur une zone de couverture pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Un système de fusion de données sera utilisé pour permettre un suivi de trajectoire et une identification plus précise à partir des descriptions audio et vidéo fournies par les différents capteurs.

La localisation avec l'antenne compacte développée est basée sur une estimation large bande de la vitesse particulière en un point avec 13 microphones MEMS numériques sensibles à la pression acoustique uniquement. De la réduction de bruit par filtrage spatial est effectuée en amont des tâches de détection et d'identification. Ces dernières tâches sont effectuées par machine learning à partir d'une base de données de signatures acoustique, qui dépendra de l'application visée.

# Liste des participants

Ahmed	Abbad	ahmed.abbad@femto-st.fr
Frédéric	Ablitzer	frederic.ablitzer@univ-lemans.fr
Omar	Aklouche	omar.aklouche@univ-lemans.fr
Sylvain	Amailland	sylvain.amailland@univ-lemans.fr
Guillaume	Baudet	guillaume.baudet@renault.com
Kévin	Billon	kevin.billon@femto-st.fr
Torea	Blanchard	torea.blanchard@hotmail.fr
Paul	Bottois	paul.bottois.etu@univ-lemans.fr
Léa	Bouffaut	lea.bouffaut@ecole-navale.fr
Gianluigi	Brogna	gianluigi.brogna@insa-lyon.fr
Pierre-Yvon	Bryk	bryk@lma.cnrs-mrs.fr
Boris	Burgarella	burgarella@lma.cnrs-mrs.fr
Pauline	Butaud	pauline.butaud@univ-fcomte.fr
Justine	Carpentier	jucarpentier59@gmail.com
Lucien	Charroyer	lucien.charroyer@doctorant.ec-lyon.fr
Adrien	Chassaigne	adrien.chassaigne@supmeca.fr
Alice	Chauvin	ase.chauvin@gmail.com
Gaël	Chevallier	gael.chevallier@univ-fcomte.fr
Matthias	Cosnefroy	matthias.cosnefroy@isl.eu
Rémi	Cousson	remi.cousson@ifsttar.fr
Nicolas	Dauchez	nicolas.dauchez@utc.fr
Enora	Denimal	enora.denimal@doctorant.ec-lyon.fr
Jean François	Deü	jean-francois.deu@cnam.fr
Jean-Luc	Dion	jean-luc.dion@supmeca.fr
Thomas	Dupont	thomas.dupont@u-bourgogne.fr
Thomas	Durand-Texte	thomas.durand-texte@univ-lemans.fr
Arnaud	Duval	arnaud_duval@orange.fr
Kerem	Ege	kerem.ege@insa-lyon.fr
Charly	Faure	faure.charly@gmail.com
Emmanuel	Foltete	emmanuel.foltete@femto-st.fr
Pascal	Fossat	pascal.fossat@entpe.fr
Mathieu	Gaborit	mathieu.gaborit@univ-lemans.fr
Simon	Gatignol	simon.gatignol@doctorant.ec-lyon.fr
François	Gautier	francois.gautier@univ-lemans.fr
Jean-Michel	Genevaux	jmgenev@univ-lemans.fr
Martin	Ghienne	martin.ghienne@lecnam.net

Paul	Gning	paul.gning@utc.fr
Adrien	Goeller	adrien.goeller@supmeca.fr
Océane	Grosset	oceane.grosset@univ-lemans.fr
Hichem	Hamdad	hichem.hamdad@renault.com
Philippe	Herzog	herzog@lma.cnrs-mrs.fr
Christophe	Hoareau	christophe.hoareau@ens-cachan.fr
Elisa	Hubert	elisa.hubert@safrangroup.com
Florian	Hugues	huguesflorian@live.fr
Volodymyr	Iurasov	iurasov@lma.cnrs-mrs.fr
Kévin	Jaboviste	kevin.jaboviste@femto-st.fr
Matthew	Kamrath	kamrath64@gmail.com
Alexandre	Lardeau	alexandre.lardeau@u-bourgogne.fr
Justine	Larivière	justine.lariviere@femto-st.fr
Jean-Christophe	Le Roux	jcleroux@cttm-lemans.com
Gautier	Lefebvre	lefebvre.gautier@gmail.com
Lei	Lei	lionel0823@gmail.com
Julien	Leng	julien.leng.etu@univ-lemans.fr
Hoang Tuan	Luu	hoang-tuan.luu@u-pem.fr
Fabien	Marchetti	fabien.marchetti@yahoo.com
Pierre-Olivier	Mattei	mattei@lma.cnrs-mrs.fr
Gaël	Matten	gael.matten@femto-st.fr
Laurent	Maxit	laurent.maxit@insa-lyon.fr
Manuel	Melon	manuel.melon@univ-lemans.fr
Valentin	Meyer	valentin.meyer@dcnsgroup.com
Samira	Mohamady	smo@akustik.rwth-aachen.de
Said	Naji	said.naji@valeo.com
Guilherme Orelli	Paiva	guilherme.paiva.etu@univ-lemans.fr
Morvan	Ouisse	morvan.ouisse@univ-fcomte.fr
Adrien	Pelat	adrien.pelat@univ-lemans.fr
Nicolas	Peyret	nicolas.peyret@supmeca.fr
Charles	Pezerat	charles.pezerat@univ-lemans.fr
Cédric	Pinhede	pinhede@lma.cnrs-mrs.fr
Julien	Poittevin	julien.poittevin@univ-lemans.fr
Nicolas	Poulain	npoulain@cttm-lemans.com
Aro	Ramamonjy	aroramamonjy@gmail.com
François	Reynard	francois.reynard@dcnsgroup.com
Leandro	Rodrigues Cunha	leandro.rodrigues@femto-st.fr
Vincent	Roggerone	roggerone.vincent@live.fr
Marco	Rosatello	marco.rosatello@gmail.com
Emeline	Sadoulet-Reboul	emeline.sadoulet-reboul@univ-fcomte.fr

Maryna	Sanalatii	m.sanalatii@gmail.com
Borys	Shchukin	borys.shchukin@eseo.fr
Antoine	Sternberger	antoine.sternberger@orange.fr
Christophe	Vergez	vergez@lma.cnrs-mrs.fr
Romain	Viala	romain.viala@univ-fcomte.fr
Adrien	Vidal	adrien.vidal@genesis.fr
Pierre	Vigué	vigue@lma.cnrs-mrs.fr
Mehdi	Zerrad	mehdi.zerrad@insa-lyon.fr
Changwei	Zhou	changwei.zhou@univ-lemans.fr

## Bonus

Un des thèmes d'étude au LMA est la physique des instruments de musique. C'est pourquoi, en cadeau de bienvenue, ont été répartis au hasard parmi quelques sacs de conférenciers étudiants les instruments suivants, pour la plupart des idiophones :

- deux maracas (séparées dans deux sacs)
- deux paires de castagnettes (une paire par sac au maximum, c'est assez)<sup>1</sup>
- une couronne de cymbalettes
- un sistre<sup>2</sup>
- deux bracelets de quatre grelots, un bleu et un jaune<sup>3</sup>
- un double güiro
- un diapason (modèle standard 440 Hz)<sup>4</sup>
- une boîte à musique jouant le thème du 4<sup>ème</sup> mouvement de la 9<sup>ème</sup> symphonie de Beethoven (dit *Ode à la joie*). Le saviez-vous ? Ce thème connaît plusieurs modulations<sup>5</sup> au cours du mouvement, mais le concepteur de cette boîte à musique a choisi Mi♭ majeur, tonalité qui n'est pas mise à contribution pour le thème principal<sup>6</sup>.

---

1. D'aucuns diront « et déjà trop ».

2. C'est comme le précédent, mais plus facile à dissimuler.

3. En honneur aux couleurs d'Aix-Marseille Université.

4. Fourni avec un étui en plastique, on ne regarde pas à la dépense.

5. Notamment en Si♭ majeur, dans la section en  $\frac{6}{8}$ , « Froh, wie seine Sonnen fliegen ».

6. Mais qui, on le sait, est empruntée dans l'accord *tenuto* sur « Über Sternen muß er wohnen ».

