

## Avis de soutenance

Monsieur Nassim BENBARA

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

# Reproduction sonore 3D par surface émettrice de sons dans un véhicule

THESE dirigée par : M. Nazih MECHBAL  
et co-encadrée par : M. Marc REBILLAT

Soutenance prévue le Mardi 1 juin 2021 à 9h30  
Lieu : PIMM, Arts et Métiers - Campus de Paris, 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris

### Composition du jury proposé :

Nicolas TOTARO	Professeur des universités	LVA, INSA Lyon	Rapporteur
Valeriu VRABIE	Professeur des universités	Crestic, Université de Reims	Rapporteur
Charles PEZERAT	Professeur des universités	LAUM, ENSIM	Examineur
Evangeline CAPIEZ-LERNOUT	Maître de conférences - HDR	MSME, Université Gustave Eiffel	Examineur
Nazih MECHBAL	Professeur des universités	PIMM, ENSAM	Examineur
Marc REBILLAT	Maître de conférences	PIMM, ENSAM	Examineur
Christophe BOLZMACHER	Ingénieur de Recherche	LISA, CEA	Examineur
Jean-Christophe CHAMARD	Ingénieur de Recherche	PSA	Invité

**Mots-clés :** Focalisation d'ondes de flexion, Traitement du signal, Problèmes inverses, Rendu sonore spatialisé, Jumeau numérique, Contrôle actif

**Résumé :** L'objectif principal de ces travaux est de proposer des solutions alternatives aux haut-parleurs classiques utilisés dans l'automobile. Les enjeux à la clé sont doubles. Premièrement, les structures d'habitacles de voitures telles que les portières déjà existantes sont conçues de telle sorte à accueillir des haut-parleurs électrodynamiques lourds et encombrants. Équiper les garnitures de portières en plastique directement d'actionneurs piézoélectriques ou d'excitateurs audio permettrait de libérer plus de poids et de laisser plus de liberté au design. Deuxièmement, utiliser des techniques de rendu sonore spatialisé alerterait le conducteur d'éventuels dangers et permettrait de produire du son haute-fidélité. Il existe plusieurs techniques de rendu sonore spatialisé qui nécessitent certaines conditions. Les sources sonores doivent être le plus proche possible des sources omnidirectionnelles de type piston. De plus, les méthodes de restitution sonore spatialisées sont basées sur un contrôle du champ de pression au niveau des oreilles de l'utilisateur. En environnement automobile, le nombre de passagers et la configuration géométrique de la voiture, ainsi que les variations de température et des bruits environnementaux font qu'il est nécessaire de travailler sur la source sonore directement.

De ce fait, l'approche adoptée dans ces travaux de thèse est de travailler directement sur la source sonore, à savoir la focalisation des ondes de flexion générées par les garnitures de portières équipées d'actionneurs (électrodynamiques ou piézoélectriques) afin de contrôler au mieux le champ rayonné. La plaque hôte qui peut être de forme, de matériau et d'épaisseur arbitraires.

D'abord, trois méthodes permettant de focaliser les ondes dans des milieux quelconques ont été adaptées pour des applications audio. Une étude paramétrique a été menée pour comparer à l'aide d'indicateurs de performances définies, sur un exemple simple numérique et expérimental. Il s'avère que la plus efficace dans ce cadre est l'inversion spatio-temporelle de l'opérateur de propagation, nécessitant un apprentissage préalable de la dynamique de la structure. Une validation expérimentale sur une portière de voiture est également effectuée et l'apprentissage par le biais d'un jumeau numérique au lieu de données expérimentales coûteuses en temps est validé.

Ensuite, dans un habitacle de voiture, des variations de température entre 10 °C et 60 °C existent et peuvent avoir un impact négatif sur les performances de la méthode de focalisation, principalement parce que les propriétés dynamiques de la structure hôte (constituée de polypropylène dans la plupart des cas) varient largement dans cette plage de température. Une stratégie de compensation de la température à base de jumeau numérique et de réseaux de neurones a donc été mise en place. De plus, les bruits

et vibrations dus au moteur et à la route peuvent perturber la focalisation. Une commande optimale (boucle fermée) est donc utilisée afin de garantir la performance de l'algorithme de focalisation tout en éliminant les perturbations, à savoir les contributions des deux premiers modes de plus de 15 dB. Enfin, des travaux préliminaires sur une validation numérique de la reproduction sonore spatialisée de type transaural sont présentés.