# Titre de la thèse (Francais):

Vibro-acoustique des structures périodiques : Réduction de Modèles, Caractérisation, Optimisation.

# PhD Title :

Vibroacoustics of periodic structures: Model Order Reduction, Characterization, Optimization.

Résumé de thèse (Français)

De nombreuses études identifient la pollution sonore comme une source de stresse physiologique et psychologique qui impacte négativement la santé des personnes y étant exposées. Cette reconnaissance, relativement récente, de l’impacts des nuisances sonores à conduit à l’introduction de normes et réglementations sonores de plus en plus strictes pour les industries aérospatiale, automobile et électroménagères. Cependant, ces nouvelles exigences en matière de confort acoustique entre souvent en conflit avec d’autres objectifs de conception industriels tel que la compacité, le poids, la minimisation des coûts et de l’impact écologique.

Traditionnellement, les défis techniques induits par les réglementations sonores sont résolues par l’usage joint de matériaux légers et résistants (comme l’aluminium) et de traitements vibroacoustiques s’appuyant sur les propriétés dissipatives des matériaux viscoélastiques (pour dissiper l’énergie vibratoire) et poroélastiques (pour la dissipation de l’énergie acoustique). Du fait de leur nature multi-échelles et de leurs propriétés non conventionnelles en matière de propagation des ondes, structures périodiques et métamatériaux sont depuis peu considérés comme de nouvelles solutions techniques permettant l’amélioration des performances vibroacoustiques sans trop impacter les autres objectifs de conception. En tant que tel, ils sont l’objets de maintes recherches avec pour objectifs la compréhension de leur phénoménologie et leur intégration dans le milieu industriel.

Les thématiques abordées dans ce manuscrit correspondent à trois obstacles majeurs à la réalisation du programme de recherche susmentionné. En premier lieu, les coûts de calcul associés à la modélisation de structures périodiques et de métamatériaux. Deuxièmement, l’absence d’un cadre conceptuel pour l’optimisation systématique des métamatériaux. Un tel cadre se devant de prendre en compte les spécificités des méthodes spectrales développés pour l’étude des métamatériaux. En dernier lieu, les difficultés liées à la comparaison de résultats expérimentaux (e.g. champs de déplacement) avec des résultats théoriques (e.g. nombre d’ondes).

Deux méthodes de réduction sont développées en vue de réduire les coûts de calculs associés à la modélisation de structures périodiques. La première vise l’étude de la propagation des ondes dans les structures périodiques. Elle combine des méthodes de réductions fondés sur l’analyse modale, l’analyse ondulatoire et la sous-structuration. La deuxième s’applique aux calculs de transmission acoustique. Elle se fonde sur une extension des méthodes de sous-espaces de Krylov a l’analyse multiparamétrique et permet de réduire la complexité du problème de plusieurs ordres de grandeur.

Concernant l’optimisation des métamatériaux, un cadre conceptuel permettant leur optimisation systématique via des méthodes numériques est développé. Ce cadre combine une approche systématique permettant d’obtenir les dérivées premières et secondes des fonctions objectifs à un algorithme d’optimisation quadratique successive. L’algorithme susmentionné marie une méthode de recherche linéaire (utilisé quand la fonction objective est localement convexe) à un algorithme de région de confiance ellipsoïdale (utilisée en présence de courbure négative). Le cadre conceptuel décrit dans le présent manuscrit est appliqué à des problèmes de caractérisation, de transmission acoustique, et d’optimisation vibratoire et produit des solutions effectives dans chacun de ces cas.

Pour ce qui est de la caractérisation expérimentale des milieux périodiques, une nouvelle méthode pour l’extraction de nombre d’onde est développée. Ladite méthodes requière un échantillonnage périodique des signaux considérés qu’elle utilise pour produire un opérateur de convolution compacte qui décrit les nombres d’ondes et/ou le k-space. Cette nouvelle technique est comparée à d’autre méthodes de la littérature et les surpasse en termes de précision et de rapidité.

**Mots Clés** :  
Structures périodiques, Métamatériaux, Vibroacoustique, Réduction de Modèles, Optimisation, Extraction de nombre d’onde

## Abstract (Anglais)

Noise pollution has been identified as a physiological stressor that impacts both the physiological and psychological health of those exposed to it. This recognition has motivated the imposition of stricter noise regulations which justify the increasing importance of vibroacoustic performance in a broad range of industries that includes the automotive, aerospace, building, and home appliance industries. However, the need and demand for better acoustic comfort often conflict with other design imperatives such as compactness, cost, weight, or ecological targets. Notably, an easy way to increase the vibroacoustic performance of a structure is to increase its mass which, because it requires the use of more material, impacts all the aforementioned targets.

In the past decades, the technical challenges induced by higher vibroacoustics standards have been answered by combining stiff, lightweight materials such as aluminum with so-called “vibroacoustic packages” including viscoelastic and poroelastic materials known for their respective abilities to dissipate vibration and acoustic energy. Recently, periodic structures and metamaterials have emerged as a possible, complementary way to achieve better vibroacoustic performance as they often possess unconventional wave propagation properties caused by their multi-scale nature. As a result, they have been the focus of intensive research aimed at understanding their phenomenology and leveraging it in novel vibroacoustic designs.

Three challenges to the realization of the aforementioned research program are identified and constitute the main focus of this thesis. Firstly, the computational cost associated with the modeling of metamaterial solutions. Secondly, the absence of a well-established optimization framework for the optimization of metamaterials that accounts for the specificities of the multi-scale/spectral methods developed to model them. Lastly, the difficulty to compare experimental results with numerical models as multiscale methods predict indicators that are not easily measured or estimated (e.g. wavenumbers).

To reduce the computational cost associated with the modeling of metamaterials, two model order reduction schemes are developed. The first one concerns the free and forced wave propagation in periodic media and combines mode-based and wave-based reduction methods. The proposed scheme is compared to other techniques presented in the literature and is shown to perform favorably. The second method is based on a multiparameter moment matching technique and is developed to speed up sound transmission loss computations in the shift cell operator method. A reduction of CPU time by up to three orders of magnitude is observed.

Regarding optimization, a framework for the unit-cell modeling of periodic structures and metamaterials is developed. The proposed framework combines semi-analytical derivatives of objectives functions computed through unit-cell methods with a second-order optimization algorithm. The aforementioned algorithm is an instance of sequential quadratic programming that combines a line search method (used when the optimization function is locally convex) and an ellipsoidal trust-region method. The proposed framework is applied to model updating, sound transmission loss, and vibration-based problems and produces effective solutions in all cases.

Concerning the experimental characterization of periodic media, a novel wavenumber extraction method is developed. The proposed method requires periodic sampling of the signal of interest to produce a convolution kernel that describes its wavenumbers or k-space. In this work, the proposed method is compared to other wavenumber extraction techniques presented in the literature and outperforms them in terms of speed and accuracy.

**Keywords**:  
Periodic structures, Metamaterials, Vibroacoustics, Model Order Reduction, Optimization, Wavenumber extraction