

# UNIVERSITÉ DE TOURS

École doctorale : Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers

GREMAN UMR 7347 CNRS INSA - CVL

**THÈSE** présentée par :

**Valentin GOEPFERT**

soutenue le : 11 juin 2024

pour obtenir le grade de : Docteur de l'université de Tours

Discipline/ Spécialité : Sciences de l'Ingénieur

## MODÉLISATION ET CARACTÉRISATION D'UN TRANSDUCTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE MICRO-USINÉ COUPLÉ À UN MILIEU LIQUIDE

**THÈSE** co-dirigée par :

CERTON Dominique

Professeur des universités, Université de Tours

LEVASSORT Franck

Professeur des universités, Université de Tours

**THÈSE** co-encadrée par :

BOULMÉ Audren

Ingénieur de recherche, MODULEUS SAS

**RAPPORTEURS :**

DURAND Stéphane

Maître de conférences, HDR, Université Le Mans

MARÉCHAL Pierre

Maître de conférences, HDR, Université Le Havre Normandie

**JURY :**

BOULMÉ Audren

Ingénieur de recherche, MODULEUS SAS

CERTON Dominique

Professeur des universités, Université de Tours

LEVASSORT Franck

Professeur des universités, Université de Tours

DURAND Stéphane

Maître de conférences, HDR, Université Le Mans

MARÉCHAL Pierre

Maître de conférences, HDR, Université Le Havre Normandie

DEJOURS Corinne

Professeure des universités, Université de Bordeaux

## Valentin GOEPFERT

### MODÉLISATION ET CARACTÉRISATION D'UN TRANSDUCTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE MICRO-USINÉ COUPLÉ À UN MILIEU LIQUIDE

#### Résumé :

Les systèmes ultrasonores peuvent être utilisés dans de nombreux domaines d'applications, tels que l'imagerie médicale, la biométrie, la thérapie, etc. Les transducteurs ultrasonores piézoélectriques micro-usinés (PMUT) font partie de la famille des microsystèmes électromécaniques (MEMS). Ces derniers présentent des avantages, au regard des transducteurs traditionnels, en termes de réduction de taille, de coût de fabrication, et dans une certaine mesure, de performances électroacoustiques. Ce travail de thèse porte sur la modélisation de la réponse électroacoustique d'une cellule PMUT circulaire, en s'appuyant sur la théorie classique des plaques minces de Kirchhoff. Un modèle complet a été développé, avec dans un premier temps le cas d'une cellule vibrant dans l'air, puis dans un second temps celui de la cellule vibrant dans un liquide. La prise en compte d'un liquide repose sur l'écriture d'une condition d'interface (elle découle du calcul de l'intégrale de Rayleigh) entre le PMUT et le liquide, qui permet de prendre en compte les effets de rayonnements. La résolution des équations comportementales, par la méthode des différences finies, a permis d'établir le circuit électroacoustique équivalent d'un PMUT. Le modèle que nous posons préserve la vitesse moyenne ainsi que les puissances moyennes mécanique et acoustique. Un certain nombre d'hypothèses couramment posées, mais rarement justifiées, dans la littérature, sont ici adressées et discutées. Les résultats de modélisation sont comparés à des résultats expérimentaux obtenus au moyen de plusieurs prototypes de PMUT, fabriqués à base de Nitrure d'Aluminium (AlN). Les données expérimentales comprennent des mesures électriques et des mesures dynamiques de déplacement, réalisées dans l'air et dans un liquide. Ce travail de thèse pose ainsi les premières bases de développement d'un modèle de réseaux multi-éléments constitués de centaines de cellules PMUT.

**Mots-clés :** MEMS, effets piézoélectriques, modélisation, circuit équivalent, conception, caractérisation, émission, réception.

#### Abstract:

Ultrasound systems can be used in many application areas, such as medical imaging, biometrics, therapy, etc. Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs) are part of the MicroElectroMechanical Systems (MEMS) family. Compared to traditional transducers, the latter have advantages in terms of size reduction, manufacturing cost, and to a certain extent, electroacoustic performance. This thesis focuses on the modelling of the electroacoustic response of a circular PMUT cell based on the classical theory of Kirchhoff thin plates. A complete model was developed, firstly with a cell vibrating in air and secondly with the cell vibrating in a liquid. Taking a liquid into account is based on writing an interface condition (which results from the calculation of the Rayleigh integral) between the PMUT and the liquid, thus allowing the radiation effects to be considered. Solving the behavioural equations using the finite difference method enabled the establishment of the equivalent electroacoustic circuit of a PMUT. The model we pose preserves the average velocity as well as the average mechanical and acoustic powers. Several hypotheses frequently present in the literature, yet rarely verified, are addressed, and discussed here. The modelling results are compared to experimental results obtained using several PMUT prototypes manufactured using Aluminum Nitride (AlN). The experimental data includes electrical measurements and dynamic displacement measurements carried out in air and in a liquid. This thesis thus lays the first foundations for the development of a multi-element network model made up of hundreds of PMUT cells.

**Keywords:** MEMS, piezoelectric effects, modelling, equivalent circuit, design, characterization, emission, reception.