

## Félix Sisombat

### Déformations spatiotemporelles d'interfaces induites par la force de radiation acoustique pour la conception d'un réflecteur programmable

#### Résumé:

Le contrôle de la réflexion des ondes acoustiques sur une surface peut permettre de focaliser l'énergie dans l'espace et ainsi façonner le champ d'onde selon l'application visée. Avec le développement des métasurfaces, permettant de changer la réflexion et la transmission d'une onde acoustique incidente à une interface en utilisant une structure sous longueur d'onde, il est possible d'illustrer de nouveaux horizons des lois de Snell-Descartes. Le contrôle sur la propagation d'une onde est cependant limité dans le cas de structures fixes, orientant la recherche vers de nouvelles architectures de métasurfaces reconfigurables dynamiquement en temps et en espace. Cette thèse en propose une version inédite utilisant la déformation sans contact d'une interface entre deux milieux à l'aide de la pression de radiation acoustique.

Ce travail de thèse s'articule autour de deux parties. La première vise à caractériser en espace et en temps la déformation d'une interface fluide par la pression de radiation acoustique. Dans un premier temps, une étude de la hauteur maximale du déplacement de la surface induit par une excitation transitoire monosource est présentée. Un intérêt particulier est porté sur les différentes méthodes expérimentales (appareil photographique et laser confocal) permettant d'évaluer les caractéristiques spatiales et temporelles de la déformation d'interface. Puis, la caractérisation globale des propriétés de la déformation est réalisée. Il est mis en évidence l'influence et le rôle prépondérant de la distribution spatiale et temporelle du faisceau ultrasonore utilisé dans le processus de déformation de l'interface étudiée. L'étude expérimentale est ensuite étendue à la génération de formes complexes et reconfigurables en temps réel à la surface d'un fluide à l'aide d'une excitation acoustique multisource. Cette caractérisation établit les bases pour l'élaboration d'une métasurface programmable en temps réel avec la pression de radiation acoustique.

La seconde partie de ce travail vise à appliquer les résultats précédents à la réalisation de métasurfaces programmables. La pression de radiation à l'interface eau-air est tout d'abord utilisée pour concevoir une cellule unitaire accordable et résonante à une échelle sous-longueur d'onde. Cette cellule unitaire est un résonateur de Helmholtz dont la fréquence de résonance peut être modifiée de façon programmable en utilisant la déformation d'interface induite acoustiquement pour modifier le volume de la cavité du résonateur. Une étude analytique, numérique et expérimentale est ensuite réalisée pour évaluer le déphasage induit sur une onde incidente dans l'air en fonction de la pression de radiation acoustique générée dans l'eau. La possibilité de programmer le déphasage en tout ou rien ou de façon progressive est testée avec succès. Enfin, une métasurface est conçue en juxtaposant plusieurs cellules unitaires de ce type. Un effet de r tror flexion est alors mis en évidence numériquement, montrant ainsi le potentiel de la démarche proposée.

Pour conclure, la cellule résonante accordable développée dans ce travail de thèse permet la réalisation de métasurfaces reconfigurables en temps réel et sans contact et ouvre des possibilités nouvelles pour réaliser des fonctions comme la déflexion de faisceaux, de l'holographie acoustique, du camouflage acoustique ou le codage d'informations.

Mots clés : Ultrasons, Acoustique, Pression de radiation, D formation, M tasurface, R flecteur

#### Summary:

Controlling the reflection of acoustic waves on a surface can enable the energy focusing in space and thus shape the wave field according to the intended application. With the development of metasurfaces, which allows changing the reflection and transmission of an incident acoustic wave at an interface using sub-wavelength structures, it is possible to explore new frontiers of Snell-Descartes's laws. However, their control over wave propagation is limited by their fixed structures, directing research towards new architectures of active metasurfaces. This work proposes a novel acoustic metasurface architecture utilizing non-contact deformation of an interface between two media through acoustic radiation pressure.

This thesis is divided into two parts. The first part aims to characterize the spatial and temporal deformation of a fluid interface induced by acoustic radiation pressure. First of all, a study of the maximum height displacement of the surface induced by a mono-source transient excitation is presented. A special attention is given to different experimental methods (camera and confocal laser) for evaluating the spatial and temporal characteristics of interface deformation. Then, a characterization of deformation properties is conducted. It highlights the influence and significant role of the spatial and temporal distribution of the ultrasonic beam used in the interface deformation process. The experimental study is then extended to the generation of complex and reconfigurable shapes in real-time on the surface of a fluid using multi-source acoustic excitation. This characterization establishes the foundations for the development of a real-time programmable metasurface using acoustic radiation pressure.

The second part of this work aims to apply the previous results to the realization of programmable metasurfaces. Acoustic radiation pressure at the water-air interface is first used to design a tunable and resonant unit cell at a sub-wavelength scale. This unit cell is a Helmholtz resonator, whose resonance frequency can be programmably modified by using acoustically induced interface deformation to change the volume of the resonator cavity. An analytical, numerical, and experimental study is then conducted to evaluate the phase shift induced on an incident wave in air as a function of the acoustic radiation pressure generated in water. The ability to program the phase shift as a switchable or incremental change is successfully tested. Finally, a metasurface is designed by juxtaposing several unit cells of this type. A retroreflection effect is then numerically demonstrated, thus showcasing the potential of the proposed approach.

In conclusion, the tunable unit cell developed in this Ph.D. work, enables real-time and non-contact reconfigurable metasurfaces, open up new possibilities for functions such as beam deflection, acoustic holography, acoustic camouflage, or information encoding.

Keywords : Ultrasound, Acoustic, Radiation pressure, Deformation, Metasurface, Reflector