



DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **14 octobre 2025**

Nom de famille et prénom de l'auteur. e : **Monsieur Mehdi FAWAZ**

Titre de la thèse : Cavitation sous transferts extrêmes

Résumé



Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'ANR CASTEX, dont l'objectif est d'étudier les transferts d'énergie à très courte échelle en utilisant comme système modèle des nanoparticules en solution. La thèse se focalise donc sur la formation de bulles générées par l'interaction entre des nanoparticules immergées dans l'eau et un laser pulsé. Cette thèse présente deux approches, l'une expérimentale, portant sur l'étude de la fragmentation de colloïdes d'or irradiés par laser, et l'autre numérique, portant sur le développement d'un code de type champ de phase permettant de simuler la réponse photoacoustique et la vaporisation autour d'une nanoparticule immergée dans de l'eau et irradiée par un pulse laser. Pour notre étude expérimentale, le but initial était d'étudier les régimes photoacoustiques et de vaporisation autour de nanoparticules irradiées par un laser nanoseconde, en régime de faible excitation (basse fluence). J'ai alors développé un système pompe-sonde d'imagerie en ombroscopie des bulles générées par laser. Cependant, l'expérience a vite montré que les seules observations directes possibles de génération de bulles, malgré une résolution du système d'imagerie de l'ordre de $1\mu\text{m}$ et une résolution temporelle nanoseconde, ne se feraient que dans le cadre du régime de fragmentation. L'analyse des données générées a nécessité la construction d'un modèle basé sur la définition d'une dynamique de bulle en grandeur adimensionnée dans le régime inertiel, et s'appuyant sur le modèle de Rayleigh-Plesset. Le modèle a été paramétrisé à partir de données collectées dans de précédentes études de l'équipe. Appliqué à l'observation d'un grand nombre de bulles, j'ai pu remonter à la dynamique et à la statistique des tailles maximales de bulles générées par l'irradiation d'un colloïde dans l'eau. De plus, des mesures de la puissance transmise à travers les colloïdes, pour différentes tailles de nanoparticules, nous ont permis d'estimer la puissance absorbée lors de la création et de la génération d'un plasma dans ces régimes de fragmentation. Enfin, nous avons mis en évidence la faible dépendance de la taille moyenne des colloïdes formés par fragmentation vis-à-vis de la fluence laser, dès lors qu'elle dépasse le seuil de

fragmentation, et ce, quelle que soit la taille des particules initiales, de 20 nm à 200 nm. Ces résultats nous permettent de mieux comprendre comment l'énergie est absorbée dans ces régimes, ce qui est utile pour la synthèse de matériaux en milieu liquide. Cette thèse présente aussi un travail de modélisation numérique de l'interaction entre nanoparticule et pulse laser. Je présente ici le modèle du code de champ de phase, entièrement développé pour nos travaux, simulant une nanoparticule chauffée par un pulse laser et échangeant sa chaleur avec de l'eau liquide environnante, pouvant aller jusqu'à sa vaporisation et la création d'une bulle. Dans ce modèle, je détaille des expressions dérivables et analytiques de la viscosité, la capacité thermique, et la conductivité thermique, basées sur des données tirées du NIST (National Institute of Standards and Technology). Ces expressions permettent des prédictions quantitatives de la thermodynamique de l'eau liquide, vapeur, ou métastable grâce à l'utilisation d'une règle de mélange entre les phases stables liquide-vapeur. Nous détaillons alors les seuils de vaporisation prédits par nos simulations, pour différentes durées d'impulsion laser, différentes tailles de nanoparticules, et différentes valeurs de conductance thermiques d'interface entre la nanoparticule et le fluide. Nous étudions finalement la dynamique des nanobulles générées ainsi que les ondes acoustiques générées par l'échauffement des nanoparticules. Ces ondes présentent des applications en médecine, notamment pour la photoporation des membranes biologiques. Nous discutons les conditions d'optimisation de photoporation.

Mots-clés : Bulles, Laser, Nanoparticules, Transferts