

Titre en français : Forme, taille, composition et dynamique tridimensionnelle de microparticules avec l'holographie numérique en ligne

Titre en anglais (PhD Title): *Shape, size, composition, and three-dimensional dynamics of micro-particles with Digital In-line Holography*

Nom et coordonnées du directeur de thèse / Name and contact details of thesis supervisor:

Fabrice Onofri (Directeur de Recherche au CNRS), [RG](#)

Tel : +33491106892

Mèl/e-Mail : fabrice.onofri@univ-amu.fr

Laboratoire/laboratory : IUSTI UMR 7343, Aix Marseille Université, CNRS, [IUSTI](#)

Financement (bourse de thèse) : demandé

Funding (grant): *requested*

Type de financement (bourse de thèse): contrat doctoral de trois années d'Aix-Marseille Université

Type of funding (PhD grant): *three-year doctoral contract from Aix-Marseille University*

Résumé en français :

L'objectif de cette thèse de doctorat est de développer une méthode optique directe, ou inverse, permettant la caractérisation in-situ de la dynamique 3D, de la forme, de la taille et de la composition de micro-particules rencontrés dans les écoulements multiphasiques. L'approche retenue sera axée sur le principe de l'holographie numérique en ligne (DIH), c'est-à-dire une technique d'imagerie cohérente, prometteuse et en plein développement, qui fournit des informations instantanées sur un volume entier à partir de l'enregistrement d'une seule image en intensité^[1-3].

Ce travail de recherche de trois ans sera réalisé à Marseille, au sein du laboratoire IUSTI du CNRS et d'Aix-Marseille Université, dans le cadre de deux projets nationaux impliquant jusqu'à quatre laboratoires de physique, de traitement du signal et de l'image, de mécanique des fluides et de génie chimique^[4, 5].

Trois contributions principales, couvrant différents aspects scientifiques, sont prévues :

(i) La grande majorité des analyses DIH sont actuellement réalisées avec un modèle de diffraction scalaire (méthode spectrale angulaire, approximations de Rayleigh-Sommerfeld ou d'Airy...)^[6], alors que seuls des calculs électromagnétiques rigoureux^[7] peuvent générer des hologrammes étalons ou bien alimenter avec des données fiables les algorithmes d'apprentissage automatique (*machine learning*). Le problème est que ces calculs électromagnétiques sont limités à des particules de petite taille. En outre, ils nécessitent des ressources informatiques considérables, ce qui est rédhibitoire pour les analyses en temps réel, les expériences de laboratoire au quotidien et bien évidemment la recherche appliquée ou le control de procédés industriels. D'autre part, il existe des approches asymptotiques, généralement basées sur des approximations asymptotiques du type optique physique et géométrique^[8-11], qui sont numériquement performantes mais dont la résolution est fréquemment remise en cause. Après une recherche bibliographique visant à familiariser le doctorant avec le sujet, ses premiers travaux de recherche porteront sur l'évaluation numérique des

avantages et inconvénients des deux approches, et en particulier des outils récemment développés par le laboratoire. Un accent particulier sera mis sur l'amélioration de la méthode du jet photonique (caustique générée par des particules réfractantes hautement symétriques)^[9] et la compression d'hologrammes.

(ii) Des expériences de laboratoire avec des paramètres hautement contrôlés (positionnement 3D des particules, taille, forme et composition) sont nécessaires pour évaluer avec précision la qualité des modèles de formation et de propagation des hologrammes. Ces données seront également précieuses pour la qualification des méthodes de rétropropagation, ainsi que des méthodes paramétriques et des méthodes inverses développées par d'autres groupes^[12-14] ou les partenaires^[9,15] du projet ATICS^[4]. A cette fin, des particules uniques (gouttelettes de liquides purs ou nano suspensions, agrégats de microsphères et cristaux, d'une taille comprise entre 80 μm et 1000 μm) seront piégées (et leur séchage suivi) à l'aide d'un système de lévitation par champ acoustique^[16]. Les hologrammes correspondants seront enregistrés et analysés pour différentes distances de Fresnel, longueurs d'onde d'illumination et états de polarisation notamment. Des vérifications croisées seront effectuées à l'aide d'autres techniques laser, comme la diffractométrie à l'angle d'arc-en-ciel^[17]. Pour les particules solides des analyses ex-situ par microscopie électronique sont également prévues.

(iii) Des expériences sur des pulvérisations froides (*cold sprays*)^[18] seront également menées pour démontrer l'intérêt des développements précédents pour l'analyse d'écoulements multiphasiques complexes, d'intérêt technologique. Le laboratoire a récemment développé, avec le soutien du CNRS^[5], une expérience de pulvérisation froide où des particules de taille micrométrique sont accélérées par une buse supersonique. Ce procédé permet de créer un dépôt - froid - sur un substrat thermiquement fragile, pour la métallisation de surface de plastiques ou la production de biomatériaux par exemple^[19]. La complexité de cet écoulement réside dans sa structure 3D et ses vitesses élevées (jusqu'à 800m/s), la présence de deux types de particules solides (particules à déposer et ensemencement du flux gazeux utilisé pour déterminer la vitesse de glissement), l'astigmatisme^[20] généré par de forts gradients de densité et les ondes de choc. Des comparaisons seront menées avec les résultats obtenus par les techniques d'ombroscopie (taille et localisation bidimensionnelle) et de vélocimétrie par suivi de particules (PTV-PIV, taille et localisation bidimensionnelle) à grande vitesse, ainsi que par l'utilisation de particules calibrées (taille uniquement) et d'expériences de pesée (bilan massique uniquement).

Ce travail de thèse se terminera naturellement par une synthèse globale des résultats obtenus, la rédaction du manuscrit de thèse et ainsi que d'articles dans des revues et conférences. Une attention particulière sera portée aux perspectives et retombées de ce travail pour différents domaines scientifiques et industriels.

Résumé en anglais (*Abstract*):

The objective of this PhD thesis is to develop and validate a set of optical methods, direct and inverse, allowing the in-situ characterization of the 3D dynamics, shape, size, and composition of complex shaped micro-objects encountered in multi-phase flows. The approach retained will be focused on the principle of Digital In-line Holography (DIH), i.e. a fast-developing and promising coherent imaging technique providing instantaneous information in a whole volume from the recording of a single quadratic image^[1-3].

This three-year research work will be carried out in Marseille, within the IUSTI laboratory from CNRS and Aix-Marseille University, in the frame of two nationally funded projects involving up to four physics, signal and image processing, fluid mechanics and mechanical engineering laboratories^[4, 5].

Three main contributions, covering different scientific aspects, are planned:

(i) The vast majority of DIH analysis are currently performed with a scalar diffraction model (Angular Spectral method, Rayleigh-Sommerfeld or Airy approximations...)^[6], while only rigorous electromagnetic calculations^[7] can generate hologram standards or feed machine learning algorithm with reliable and extensive data. The problem is that electromagnetic calculations are limited to small size parameter particles. They also require substantial computing resources, which is prohibitive for real-time analysis, day-to-day basic experiments as well as industrial applications. On the other hand, there exist asymptotic approaches, i.e., physical and geometrical optics approximations^[8-11], that are numerically very effective but which resolution is frequently called into question. Following bibliographical research, aimed at familiarizing the doctoral student with the subject, his/her first task will be to evaluate numerically the pros & cons of both approaches, and in particular the tools recently developed by the laboratory. A special emphasis will be put on the analysis and improvement of the Photonic jet method (forward caustic generated by highly symmetrical refracting particles)^[9] and the compression of holograms.

(ii) Basic experiments with highly controlled parameters (particle 3D location, size, shape and composition) are needed to evaluate the asymptotic models of holograms formation, the backpropagation as well as the parametric and inverse methods of other groups^[12-14] or those^[9,15] involved in the ATICS project^[4]. To this end, single particles (droplets of pure liquids and nanosuspensions, aggregates of microspheres and crystals between 80 μm and 1000 μm in size) will be trapped (and their drying monitored) using an acoustic levitation system^[11]. The corresponding holograms will be recorded and analyzed for various Fresnel distances, illumination wavelength and polarization state of the illumination laser beam. Cross verifications and statistics will be carried out with shadowgraph and rainbow refractometry techniques^[12] plus, for solid particles, by off-line optical and electron microscopy analyses.

(iii) Experiments on cold sprays^[18] are also planned to demonstrate the interest of the proposed methods when analyzing multiphase flows of technological interest. The laboratory has recently developed, with the support of a CNRS^[5], a cold spray experiment where micrometric sized particles are accelerated by a supersonic nozzle. This process allows creating a deposit - cold - on a thermally fragile substrate, for the surface metallization of plastics or production of biomaterials for instance^[19]. The complexity of this flows lies in its 3D structure and high velocities (up to 800m/s), the presence of two types of solid particles (particles to be deposited and gas flow seeding used to determine the slip velocity), astigmatism^[15] generated by strong density gradients and shock waves. Comparisons will be made with results obtained with DIH, high-speed shadowgraph (size 2D location) and particle tracking velocimetry (particle 2D velocity) techniques, as well as by using calibrated particles (size) and mass balance (size and fluxes) experiments.

This research work will naturally be followed by an overall synthesis, the writing of the thesis manuscript and articles in journals and conferences. Particular attention will be paid to the prospects of this work for various scientific and industrial fields.

Profil du candidat recherché : master ou diplôme d'ingénieur en physique, optique ou mécanique des fluides avec de fortes appétences pour la recherche et le travail expérimental, la modélisation et les outils numériques, l'analyse et la synthèse, la rédaction (en français et en anglais).

Candidate profile: Master's degree or engineering diploma in physics, optics or fluid mechanics, with an aptitude for research and experimental work, modeling and numerical tools, analysis and synthesis, writing skills.

Date limite de dépôt des candidatures / Application deadline : 15 avril 2024 / April 15th, 2024

Date de démarrage / starting date: 1^{er} octobre 2024 / October 1st, 2024

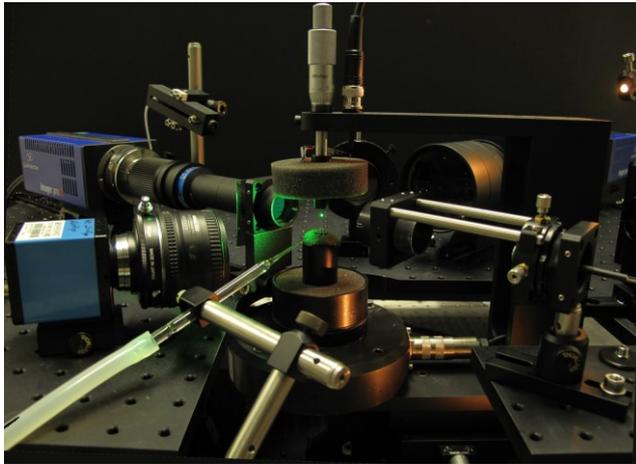
Localisation des travaux de thèse (Location of thesis work): Marseille, France, laboratory IUSTI.

Insertion professionnelle après thèse : recherche académique ou industrielle, industrie

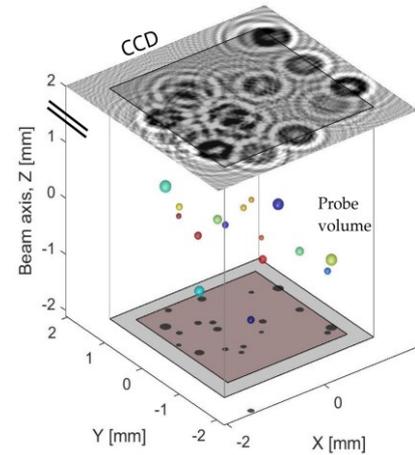
Professional integration after thesis: academic or industrial research, industry

Publications sur le sujet/References :

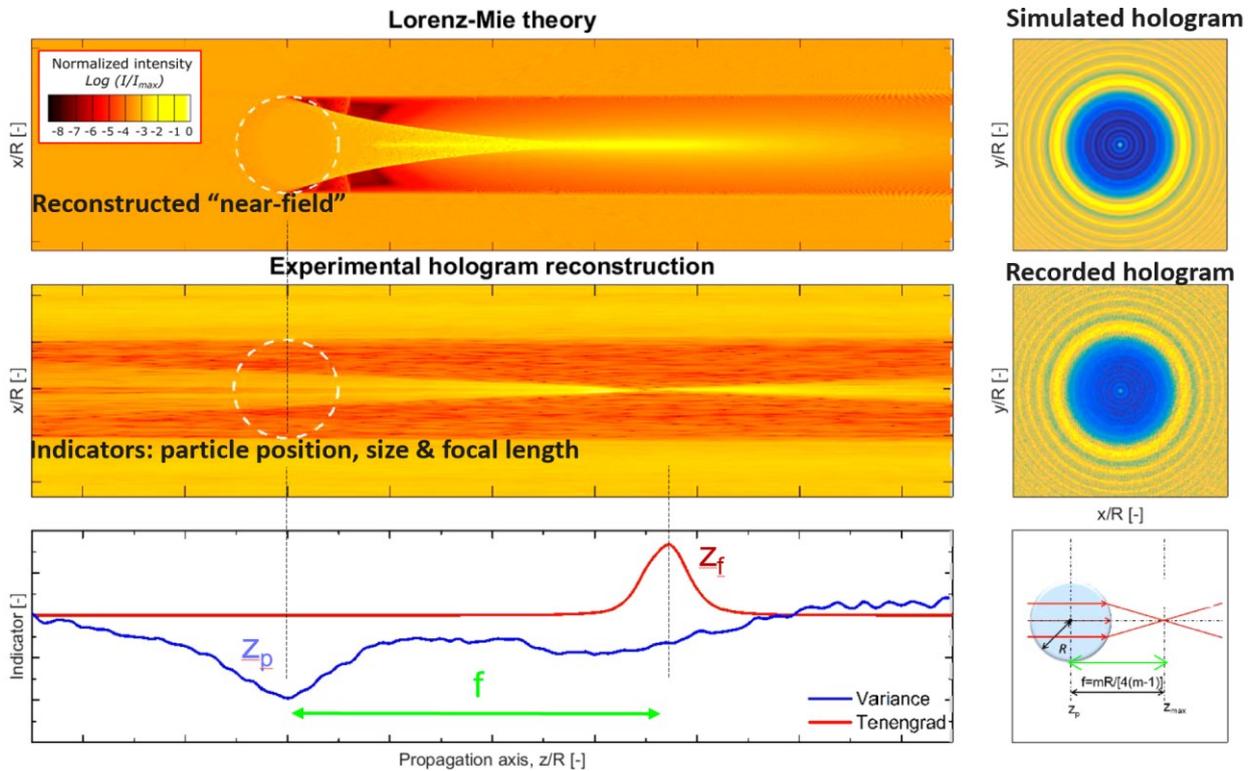
1. F. Lamadie, L. Méès, and C. Fournier, "Holographie numérique en ligne appliquée aux mesures en mécanique des fluides," *Techniques de l'ingénieur Mesures physiques base documentaire : TIP672WEB* (2022). <https://doi.org/10.51257/a-v1-r2163>
2. M. J. Berg, "Tutorial: Aerosol characterization with digital in-line holography," *Journal of Aerosol Science* 165, 106023 (2022).
3. Onofri, F., *Granulométrie optique des écoulements. Techniques de l'ingénieur Mesures physiques*, 2023. base documentaire : TIP672WEB(ref. article : r2165). <https://doi.org/10.51257/a-v1-r2165>
4. **ANR, ATICS** (Advanced Three-dimensional Imaging of Complex particulate Systems), L. Méès (LMFA, Ecole centrale, Lyon), CEA (F. Lamadie, LGC, Marcoule), LHC (UJM, Fournier, St-Etienne), IUSTI (Onofri, AMU, Marseille), 2024-2028.
5. **PEPS-CNRS, ODISCOS** (Optical Diagnostics of Supersonic Cold Spraying) , D. Camello Barros, F. Onofri, P. Dupont, IUSTI (Marseille), 2023.
6. Goodman, J.W., *Introduction to Fourier Optic*. Mac. Graw-Hill, New York, 1960.
7. Onofri, F.R.A., et al., *Laser-light and interactions with particles (LIP)*, 2022. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2023. 309: p. 108710.
8. Bi, L., et al., *Scattering and absorption of light by ice particles: Solution by a new physical-geometric optics hybrid method*. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011. 112(9): p. 1492-1508.
9. Sentis, M.P.L., F.R.A. Onofri, and F. Lamadie, *Bubbles, drops, and solid particles recognition from real or virtual photonic jets reconstructed by digital in-line holography*. *Optics Letters*, 2018. 43(12): p. 2945-2948.
10. Onofri, F.R.A., et al., *Physical-optics approximation of near-critical-angle scattering by spheroidal bubbles*. *Optics Letters*, 2012. 37(22): p. 4780-4782.
11. Duan, Q., et al., *Numerical implementation of three-dimensional vectorial complex ray model and application to rainbow scattering of spheroidal drops*. *Optics Express*, 2023. 31(21): p. 34980-35002.
12. S. Shao, K. Mallery, and J. Hong, "Machine learning holography for measuring 3D particle distribution," *Chem. Eng. Sci.*, 115830 (2020).
13. T. Latychevskaia, "Iterative phase retrieval for digital holography: tutorial," *J. Opt. Soc. Am. A* 36, D31-D40 (2019).
14. T. Latychevskaia, "Lateral and axial resolution criteria in incoherent and coherent optics and holography, near- and far-field regimes," *Appl. Opt.* 58, 3597-3603 (2019).
15. A. Berdeu, O. Flasseur, L. Méès, L. Denis, F. Momey, T. Olivier, N. Grosjean, and C. Fournier, "Reconstruction of in-line holograms: combining model-based and regularized inversion," *Opt. Express* 27, 14951-14968 (2019).
16. Schweitzer, J.-M., et al., *Spray drying of colloidal suspensions: Coupling of particle drying and transport models with experimental validations*. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021. 170: p. 224-238.
17. Ouattara, M., et al., *Droplet sizing and mixture fraction measurement in liquid flows with rainbow-angle diffractometry*. *Applied Optics*, 2017. 56(29): p. 8109-8120.
18. Papyrin, A., et al., *Cold Spray Technology*. 2006: Elsevier.
19. An, S., et al., *Supersonic Cold Spraying for Energy and Environmental Applications: One-Step Scalable Coating Technology for Advanced Micro- and Nanotextured Materials*. *Advanced Materials*, 2020. 32(2): p. 1905028.
20. Sentis, M.P.L., et al., *Digital in-line holography for the characterization of flowing particles in astigmatic optical systems*. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017. 88: p. 184-196.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 (a) Photographie d'une partie de l'expérience de lévitation acoustique. (b) Simulation électromagnétique de la formation d'hologrammes. (c) Méthode du jet photonique en DIH: la rétropropagation de l'hologramme permet la localisation 3D d'une goutte, de sa taille et composition. (a) photograph of part of the acoustic levitation experiment. (b) Electromagnetic simulation of hologram formation. (c) Photonic jet method in DIH: hologram back-propagation enables the 3D localization, size and composition analysis of a drop.