



CARACTERISATION D'INCLUSIONS MICRONIQUES DANS DES GOUTTES MILLIMETRIQUES PAR HOLOGRAPHIE NUMERIQUE

Wisuttida Wichitwong, Sébastien Coëtmellec, Denis Lebrun, Gérard Gréhan,
Daniel Allano, Marc Brunel*

CNRS UMR 6614 – CORIA, BP 12, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France

*Correspondant: marc.brunel@coria.fr

Résumé : Nous présentons la caractérisation d'inclusions microniques dans une goutte d'eau millimétrique par holographie numérique en ligne. Dans un premier temps, des expériences faites avec un temps d'exposition court permettent d'obtenir la localisation 3D des inclusions dans la goutte. Dans un deuxième temps, des expériences faites avec un temps d'exposition long permettent de visualiser les trajectoires des inclusions dans la goutte.

1 Introduction

La caractérisation d'inclusions dans des gouttes a de nombreuses applications en biologie, ou en recherche atmosphérique pour le piégeage d'aérosols et le suivi de phénomènes de givrage... Il est important de mettre en place des expériences de laboratoire permettant de caractériser finement la présence d'inclusions et leur évolution au cours du temps. Nous présentons ici l'expérience de microholographie numérique en ligne [1] que nous avons développée pour mesurer la position 3D et la taille d'inclusions microniques dans une goutte suspendue, ainsi que les résultats obtenus. Nous détaillerons d'abord l'ensemble de la chaîne de mesure, ainsi que les modèles développés pour décrire l'ensemble de cette chaîne à l'aide de matrices de transfert optiques. La reconstruction numérique des hologrammes enregistrés sera effectuée par transformée de Fourier fractionnaire à 2 dimensions. Les modèles développés nous permettent de prévoir et d'interpréter avec précision les hologrammes enregistrés : évaluation des coefficients de grandissement selon le dispositif expérimental, selon la position 3D des inclusions et le diamètre de la goutte, étalonnage de la position 3D des inclusions à l'intérieur de la goutte en fonction de l'ordre fractionnaire de reconstruction optimale.

Deux régimes seront présentés : des hologrammes enregistrés avec un temps d'exposition court pour figer la position des inclusions dans la goutte et en mesurer la taille et la position 3D, puis des hologrammes enregistrés avec exposition longue pour effectuer une trajectographie des inclusions. Nous aborderons enfin les modèles scalaires généraux développés pour décrire des inclusions du type objets transparents / semi-transparentes, présentant des variations d'indice. Dans ce cas nous décomposons l'objet à considérer sous la base de polynômes de Zernike et prédisons l'hologramme enregistré sur le capteur CCD.

2 Temps d'exposition court pour obtenir la position 3D et la taille des inclusions

Nous avons développé un banc de mesure de microholographie numérique en ligne [1] qui permet de caractériser des inclusions dans des gouttes millimétriques suspendues. La figure 1 montre un schéma de principe de l'expérience: le faisceau émis par une diode laser (longueur d'onde 642 nm) est collimaté par un premier objectif de microscope, puis focalisé dans la goutte suspendue à l'aide d'un deuxième objectif de microscope. La goutte d'eau a un diamètre ajustable entre 1 et 3 mm. Une caméra CCD placée derrière permet l'acquisition d'hologrammes numériques. Typiquement, le capteur CCD est disposé à 1 à 2 centimètres après la goutte. Les inclusions sont des sphères de silice de diamètre calibré égal à 20 microns.

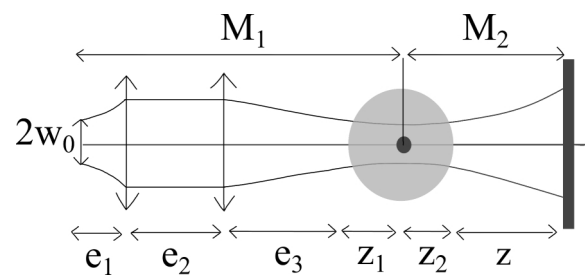


Figure 1 Schéma du dispositif expérimental.

Il est possible de simuler les figures de diffraction générées par les inclusions présentes dans la goutte dans le plan du capteur CCD. Pour ce faire, nous utilisons les modèles scalaires développés dans la référence [2]. La première partie du dispositif (de la diode laser à l'inclusion) est décrite par une première matrice de transfert optique qui contient la propagation dans les différents éléments optiques rencontrés : propagation en espace libre, transmission

à travers les 2 objectifs, réfraction par la face d'entrée de la goutte, propagation dans l'eau sur une distance z_1 . Le dioptre d'entrée de la goutte est traité comme tous les autres éléments par sa propre matrice de transfert. Après définition de cette première matrice de transfert M_1 , nous pouvons établir l'expression du champ électrique dans le plan de l'inclusion via une transformée de Huygens-Fresnel généralisée dont les coefficients dépendent de ceux de la matrice M_1 [2-5]. La deuxième partie du dispositif est ensuite décrite par sa propre matrice de transfert M_2 . Elle tient compte de la face de sortie de la goutte. Un calcul de la diffraction du champ incident par l'inclusion permet alors d'établir l'expression du champ électrique sur le capteur CCD par une seconde transformée de Huygens-Fresnel généralisée (matrice M_2).

Les reconstructions numériques sont faites par transformée de Fourier fractionnaire 2D, définie comme suit :

$$F_{\alpha_1, \alpha_2} [I(x, y)](x_a, y_a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) K_{\alpha_1}(x, x_a) K_{\alpha_2}(y, y_a) dx dy$$

Où le noyau est constitué de fonctions à dérive de fréquence linéaire :

$$K_{\alpha_i}(z, z_a) = C(\alpha_i) \exp\left(\frac{i\pi(z^2 + z_a^2)}{\varepsilon^2 \tan \alpha_i}\right) \exp\left(-\frac{i2\pi z z_a}{\varepsilon^2 \sin \alpha_i}\right),$$

avec

$$C(\alpha) = \frac{\exp\left(-i\left\{\frac{\pi}{4} \text{sign}(\sin \alpha) - \frac{\alpha}{2}\right\}\right)}{\left|\varepsilon^2 \sin \alpha\right|^{1/2}}$$

et $\alpha = a\frac{\pi}{2}$, où a est l'ordre fractionnaire.

En général les ordres fractionnaires selon les deux axes transverses x et y sont les mêmes, sauf en cas de système cylindrique.

La reconstruction est optimale quand l'ordre fractionnaire permet de compenser parfaitement la dérive de fréquence de la figure de diffraction dans le plan du capteur, créée par l'inclusion. Cette dérive étant liée au faisceau incident sur l'inclusion et aux éléments optiques entre l'inclusion et le capteur CCD, on obtient une relation analytique qui relie ces paramètres expérimentaux à l'ordre de reconstruction optimal pour un plan particulier dans la goutte (repéré par des z_1 et z_2 fixés, figure 1) [2]. La figure 2 présente une courbe de calibration typique donnant l'ordre fractionnaire de reconstruction en fonction de la distance entre l'inclusion et le capteur CCD.

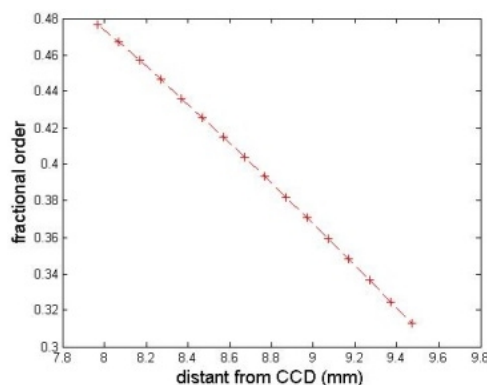


Figure 2 Ordre fractionnaire de reconstruction optimale en fonction de la distance inclusion / capteur CCD.

Les figures 3 et 4 montrent ensuite un hologramme enregistré expérimentalement et sa reconstruction optimale dans le plan de certaines inclusions. Dans ce cas elle est obtenue pour un ordre fractionnaire $a=0.48$, qui représente une distance entre l'inclusion et le capteur CCD de $7.9\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$.

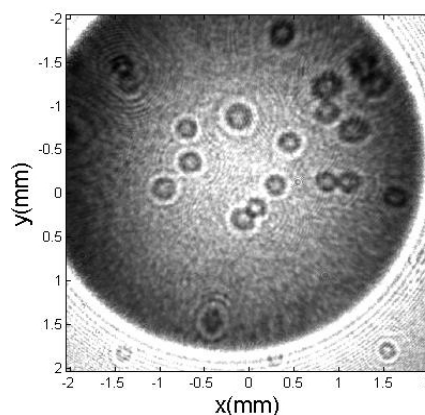


Figure 3 Hologramme en-ligne expérimental de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique

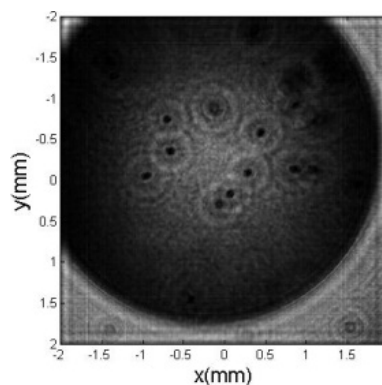


Figure 4 Reconstruction optimale de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique (expérience)

Les figures 5 et 6 montrent ensuite un hologramme simulé en respectant les paramètres expérimentaux et sa reconstruction optimale dans le plan des inclusions (toutes ont été placées dans le même plan pour cette simulation). Dans ce cas elle est obtenue pour un ordre fractionnaire $\alpha=0.5$, qui représente une distance entre l'inclusion et le capteur CCD de $7.8\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$.

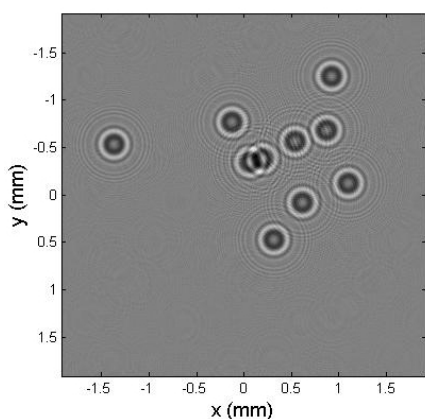


Figure 5 Hologramme en-ligne simulé de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique

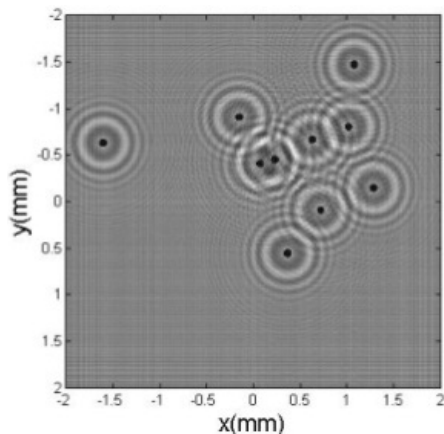


Figure 6 Reconstruction optimale de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique (simulation)

En traçant le profil des particules reconstruites, on obtient la taille des particules introduites dans la goutte ($20\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$).

3 Temps d'exposition long pour obtenir la trajectoire des inclusions

Nous avons ensuite réalisé des enregistrements avec un temps d'exposition plus long. Dans ce cas, il est possible de visualiser des portions de trajectoires des inclusions [6]. La figure 7 montre un exemple d'hologramme enregistré. Le temps d'exposition y

est de 200 millisecondes. Deux plans de reconstructions optimales de particules sont ensuite présentés sur les figures 8 et 9. Dans chacun de ces plans on observe la reconstruction d'une portion de trajectoire d'une (ou plusieurs) inclusion(s), ayant accès à sa localisation longitudinale par l'ordre fractionnaire de reconstruction, ainsi qu'à sa vitesse transversale.

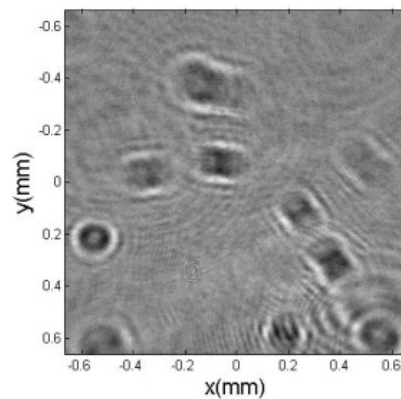


Figure 7 Hologramme en-ligne expérimental de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique avec temps d'exposition long

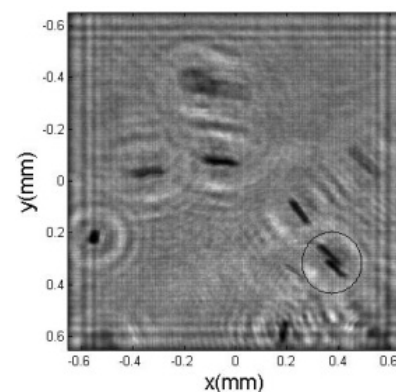


Figure 8 Reconstruction optimale de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique avec temps d'exposition long

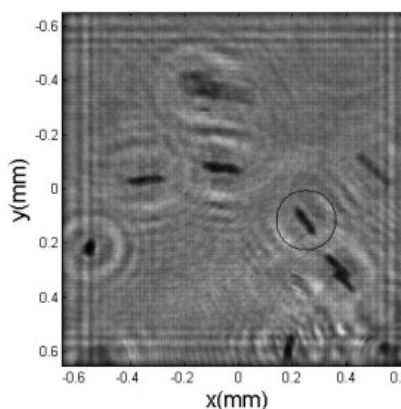


Figure 9 Reconstruction optimale de particules de 20 microns insérées dans une goutte millimétrique avec temps d'exposition long, pour un autre plan de reconstruction

Ainsi pour les particules reconstruites sur la figure 8, la distance entre les 2 inclusions entourées et le capteur CCD vaut 13.8mm. Pour la particule entourée de la figure 9, la distance entre l'inclusion et le capteur CCD vaut 13.6mm (Notons que le capteur CCD a été légèrement déplacé pour cette nouvelle série d'images, par rapport au paragraphe 2). Sur les particules encadrées de la figure 8, les vitesses transversales des 2 particules sont :

(0.32mm/s, 0.27mm/s) et (0.28mm/s, 0.25 mm/s)

Pour la particule encadrée de la figure 9, sa vitesse transversale vaut : (0.30mm/s, 0.39mm/s).

La précision sur la détermination de la position longitudinale des inclusions est de l'ordre de 100 microns. Cette valeur est trop élevée pour nous permettre de déterminer la vitesse longitudinale des inclusions.

Ces reconstructions ne permettent pas de déterminer le sens des trajectoires. Pour y parvenir, on peut utiliser une double exposition (impulsion courte puis impulsion longue) : la première impulsion (courte) permet de repérer le début d'une trajectoire, puis la deuxième (longue) la portion de trajectoire pendant le temps d'exposition correspondant [7].

4 Modèles généraux pour inclusions transparentes inhomogènes

Il est possible de simuler les hologrammes créés par des inclusions sphériques de natures différentes : opaques, semi-transparentes et transparentes, homogènes ou inhomogènes [8]. Nous ne détaillons pas ici les calculs relativement complexes et renvoyons le lecteur à la référence [8] :

- Comme dans [2], nous calculons l'expression du champ électrique dans le plan de l'inclusion par une première transformée d'Huygens-Fresnel généralisée.
- Le coefficient de transmission de l'inclusion est ensuite décomposé sur la base des polynômes de Zernike, ce qui permet de décrire des inclusions avec des variations d'indice importantes et complexes.
- Une deuxième transformée d'Huygens-Fresnel généralisée permet ensuite d'établir l'expression du champ électrique dans le plan du capteur CCD.

Grâce à ces modèles, nous sommes capables de prévoir les variations fines introduites par des inhomogénéités d'indice des inclusions.

Conclusions et remerciements

L'holographie numérique nous permet de visualiser et localiser en 3D des inclusions présentes dans des gouttes. En ajustant le temps d'exposition, on peut s'intéresser à la position des particules ou plutôt à leurs trajectoires. Des modèles scalaires développés récemment devraient nous permettre de mieux

appréhender les modifications apportées par les inhomogénéités d'inclusions transparentes, phénomènes que des expériences de contraste de phase ne nous permettent pas encore de prédire [9]. Ces expériences de laboratoire devraient nous permettre de suivre en temps réel des phénomènes de givrage.

Ce projet est supporté par le projet LABEX 3D.

5 References

- [1] Xu W., Jericho M.H., Kreuzer H.J., Meinertzhagen I.A., Tracking particles in four dimensions with in-line holographic microscopy, *Optics Letters* 28(3):164-166 (2003)
- [2] Verrier N., Coëtmellec S., Brunel M., Lebrun D., Digital in-line holography in thick optical systems: application to visualization in pipes, *Applied Optics* 47:4147-4157 (2008)
- [3] Palma C., Bagini V., Extension of the Fresnel transform to ABCD systems. *Journal of the Optical Society of America A* 14:1774-1779 (1997)
- [4] Lambert A.J., Fraser D., Linear systems approach to simulation of optical diffraction. *Applied Optics* 37:7933-7939 (1998)
- [5] Yura H.T., Hanson S.G., Optical beam wave propagation through complex optical systems. *Journal of the Optical Society of America A* 4:1931-1948 (1987)
- [6] Lebrun D., Méès L., Fréchou D., Coëtmellec S., Brunel M., Allano D., Long time exposure digital in-line holography for 3-D particle trajectory, *Optics Express* 21(20):23522-23530 (2013)
- [7] Wichitwong W., Coëtmellec S., Lebrun D., Allano D., Gréhan G., Brunel M., Long exposure time digital in-line holography for the trajectory of micronic particles within a suspended millimetric droplet, *Optics Communications* 326:160-165 (2014)
- [8] Coëtmellec S., Wichitwong W., Gréhan G., Lebrun D., Brunel M., Janssen A.J.E.M., Digital In-Line holography assessment for general phase and opaque particles. À paraître dans *J. Europ. Opt. Soc.: Rap. Public.* 9 (2014)
- [9] Brunel M., Coëtmellec S., Lebrun D., Aït Ameer K. Digital phase contrast with the fractional Fourier transform, *Applied Optics* 48:579-583 (2009)