



**HAL**  
open science

# HOLOGRAPHIE NUMERIQUE ET APPROCHES INVERSES POUR LA CALIBRATION DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Nicolas Verrier, Corinne Fournier, Thierry Fournel, Loïc Mèès

► **To cite this version:**

Nicolas Verrier, Corinne Fournier, Thierry Fournel, Loïc Mèès. HOLOGRAPHIE NUMERIQUE ET APPROCHES INVERSES POUR LA CALIBRATION DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX. 3ème rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2014, Ecully, France. hal-01112618

**HAL Id: hal-01112618**

**<https://hal.science/hal-01112618v1>**

Submitted on 3 Feb 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

## HOLOGRAPHIE NUMERIQUE ET APPROCHES INVERSES POUR LA CALIBRATION DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Nicolas Verrier, Corinne Fournier, Thierry Fournel  
Université de Lyon, CNRS UMR-5516 Laboratoire Hubert Curien, Université de Saint-Etienne Jean Monnet, 18 rue Professeur Benoît Lauras, 42000 Saint-Etienne  
[nicolas.verrier@univ-st-etienne.fr](mailto:nicolas.verrier@univ-st-etienne.fr), [corinne.fournier@univ-st-etienne.fr](mailto:corinne.fournier@univ-st-etienne.fr), [fournel@univ-st-etienne.fr](mailto:fournel@univ-st-etienne.fr)

Loïc Mées  
Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA), UMR CNRS-5509 Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully  
[loic.mees@ec-lyon.fr](mailto:loic.mees@ec-lyon.fr)

### MOTS CLES

Astigmatisme, Méthodes de reconstruction d'images, Métrologie, Problèmes Inverses, Bornes de Cramer Rao

### RESUME

L'utilisation d'un algorithme de reconstruction par approche inverses est proposée pour la calibration d'un dispositif d'holographie numérique à référence astigmatique. L'utilisation d'un modèle d'imagerie adapté couplée à l'acquisition d'hologrammes d'objets calibrés rend alors possible l'estimation de paramètres tels que la position des différents éléments optiques du montage.

### I. HOLOGRAPHIE A REFERENCE ASTIGMATE

Les configurations classiques d'holographie en ligne reposent sur l'utilisation d'une onde de référence collimatée ou sphérique. Dans ce cas, les modèles d'imagerie sont connus et permettent de rendre compte avec précision des hologrammes enregistrés [1]. Néanmoins ces modèles ne s'appliquent pas à l'étude d'écoulements canalisés. En effet, la géométrie cylindrique du confinement est à l'origine d'aberrations telles que l'astigmatisme. Pour pallier ces limitations, un formalisme couplant l'utilisation de matrices de transfert à l'intégrale de Fresnel a été proposé et appliqué avec succès à la restitution d'hologrammes d'écoulements canalisés et microcanalisés [2-4].

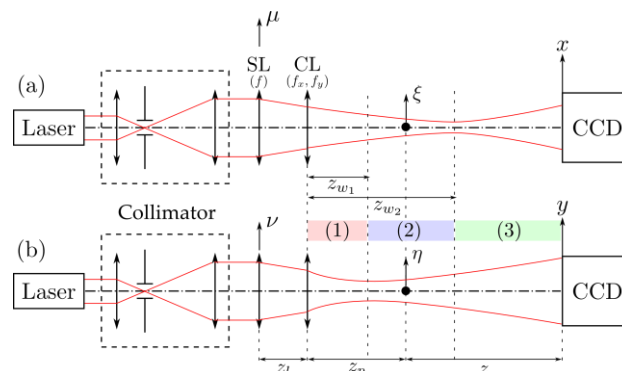
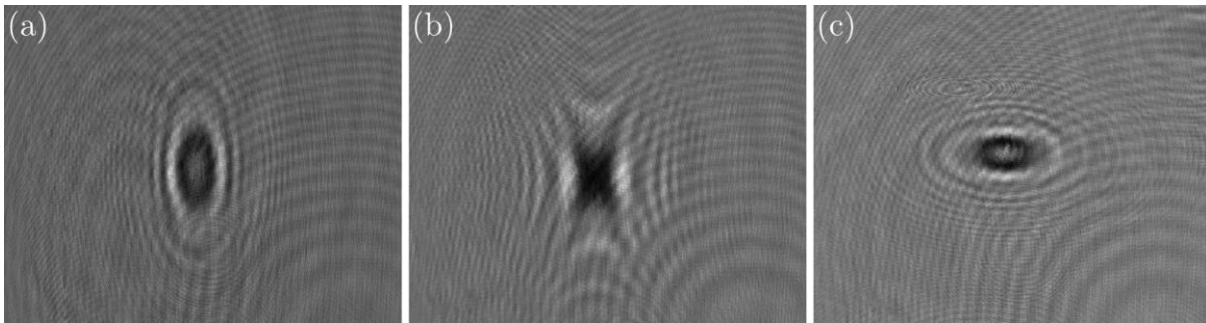


Figure 1. Dispositif expérimental pour l'enregistrement d'hologrammes avec référence astigmatique. (a) Plan x,z.

(b) Plan y,z.

Une expérience modèle d'holographie à référence astigmatique est proposée Figure 1. Ici, l'astigmatisme est apporté et contrôlé au moyen d'une lentille cylindrique (CL) et d'une lentille sphérique (SL). La quantité d'astigmatisme dans peut être ajustée en modifiant la distance  $z_l$  entre les deux lentilles. Dans ces conditions, l'onde de référence présentera deux waists.



**Figure 2.** Hologrammes expérimentaux d'une particule de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre avec (a)  $z_p \approx 55\text{mm}$ ,  $z \approx 165\text{mm}$  ; (b)  $z_p \approx 80\text{mm}$ ,  $z \approx 140\text{mm}$  ; (c)  $z_p \approx 120\text{mm}$ ,  $z \approx 100\text{mm}$

L'objet considéré est un disque calibré en chrome de diamètre  $2r = 100\mu\text{m}$  déposé sur une lame de verre. Comme le montre la Figure 2, la position de l'objet le long de l'axe optique du système affecte fortement les figures d'interférences enregistrées. Ainsi lorsque l'objet est situé avant le premier waist ou après le second (Fig. 2(a) et (c)), les figures d'interférences enregistrées sont elliptiques ; pour un objet situé entre les deux waists du faisceau (Fig. 2(b)), les figures d'interférences seront hyperboliques [5].

## II. RECONSTRUCTION D'HOLOGRAMMES PAR APPROCHE PROBLEMES INVERSES

Les hologrammes considérés pour cette étude dépendent d'un nombre limité de paramètres. Ainsi, l'utilisation d'algorithmes de reconstruction gloutons est possible [6-7]. Cette approche itérative vise à trouver, au sens des moindres carrés, le meilleur accord entre le modèle d'imagerie et l'hologramme expérimental. L'algorithme proposé est non supervisé et se divise en trois étapes :

1. La détection globale qui vise à trouver le meilleur accord entre les données et un dictionnaire de modèles. Cette étape permet d'obtenir une première approximation des paramètres dans un espace échantillonné.
2. L'optimisation locale qui permet d'ajuster le modèle aux données pour un raffinement de l'estimation sub-pixel des paramètres.
3. Le nettoyage au cours duquel le modèle détecté est retranché aux données afin d'améliorer le rapport signal à bruit des résidus pour la détection des objets restants.

Cet algorithme est ensuite répété sur les résidus de calcul jusqu'à ce qu'aucun objet ne soit détecté.

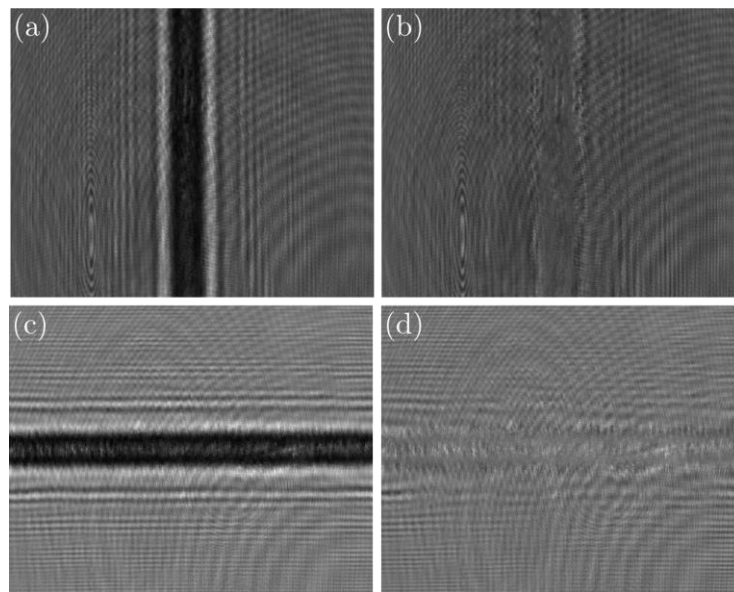
## III. CALIBRATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL PAR APPROCHE INVERSE

La reconstruction d'hologramme par approches inverses permet d'obtenir une très bonne précision sur l'estimation des paramètres de l'objet  $(x, y, z, r)$  [8]. Nous proposons ici de réaliser la reconstruction d'hologrammes d'objets calibrés pour réaliser la calibration du dispositif expérimental proposé Figure 1. Deux paramètres doivent être estimés avec

précision : la distance entre les deux lentilles  $z_l$  et la distance entre la cylindrique et la caméra

$$z_{tot} = z_p + z.$$

Ces deux paramètres étant fortement corrélés, cette estimation est faite en deux étapes. La première étape consiste à réaliser une optimisation sur la distance  $z_l$  entre les deux lentilles. En effet, cette distance affecte la position des deux waists par rapport à la lentille cylindrique. Pour réaliser cette estimation, une étude des bornes de Cramer Rao nous indique que la précision sera la meilleure pour un objet situé dans les waists du faisceau [5]. Ainsi, dans un premier temps l'objet calibré est positionné dans le premier waist du faisceau. La seconde étape vise à réaliser une optimisation sur la distance  $z_{tot} = z_p + z$ . Comme la position des deux waists du faisceau est fixée par la première étape, la seconde étape se résume à estimer la position du second waist par rapport au capteur. Ainsi, cette estimation est réalisée en reconstruisant l'hologramme d'un objet calibré positionné dans le second waist.



**Figure 3.** Calibration de  $z_l$  et  $z_{tot}$ . (a) Hologramme d'un disque opaque de  $100\mu\text{m}$  de diamètre positionné dans le premier waist du faisceau. (b) Résidus après reconstruction. (c) Hologramme d'un disque opaque de  $100\mu\text{m}$  de diamètre positionné dans le second waist du faisceau. (d) Résidus après reconstruction.

Les hologrammes obtenus pour les deux étapes sont proposés Figure 3. Comme le premier waist est horizontal, la figure d'interférences obtenues présente des franges verticales (Fig. 3(a)). De même, le second waist étant vertical, les franges d'interférences enregistrées pour l'objet positionné dans le second waist sont horizontales (Fig. 3(c)). Les résidus après optimisation sont proposés Figures 3(b) et (d).

En utilisant cette méthode de calibration du dispositif expérimental, la distance entre les deux lentilles a été estimée à  $z_l = 17.2\text{mm}$  et la distance entre la lentille cylindrique et le capteur à  $z_{tot} = 221.2\text{mm}$ .

#### IV APPLICATION A LA RECONSTRUCTION D'HOLOGRAMMES EN REFERENCE ASTIGMATE

Le dispositif expérimental ayant été calibré, il est dorénavant possible de reconstruire les hologrammes proposés Figure 2. Les étapes d'optimisation globale et locale de notre algorithme de reconstruction porteront uniquement sur les paramètres de notre objet, à savoir  $x, y, z, r$ . Les résidus après optimisation, proposés Figure 4 montrent que notre méthode de

reconstruction par approche inverse permet de traiter les hologrammes enregistrés avec une onde de référence astigmatique.

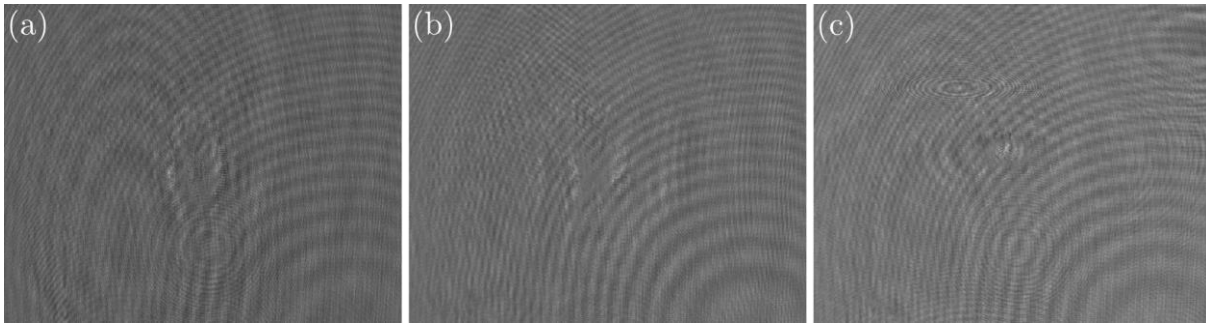


Figure 4. Résidus de calculs après reconstruction des hologrammes de la Figure 2.

Tableau 1. Paramètres des particules pour chaque hologramme

Hologramme	$x (\mu m)$	$y (\mu m)$	$z (mm)$	$r (\mu m)$	Corrélation
(a)	65.0	-81.3	165.5	49.45	0.67
(b)	62.9	22.5	138.4	49.87	0.79
(c)	-18.7	-76.3	100.8	49.94	0.59

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1. Les coefficients de la corrélation normalisée entre le modèle et les données acquises illustrent les capacités de notre approche à traiter les hologrammes enregistrés avec une référence astigmatique. La précision sur l'estimation des différents paramètres a été déterminée au travers d'une analyse statistique réalisée au moyen de la reconstruction de 100 hologrammes. Ainsi l'écart type sur les valeurs du rayon est de  $0.12 \mu m$ , et les écarts types sur les positions latérales et axiales sont respectivement de  $1.69 \mu m$  et  $30 \mu m$ .

## CONCLUSIONS

L'utilisation de méthodes de reconstruction basées sur les approches problèmes inverses a été démontrée pour le traitement d'hologrammes enregistrés avec une référence astigmatique. Le traitement d'hologrammes d'objets calibrés positionnés dans les waists du faisceau a permis de réaliser une calibration du dispositif expérimental. Le bien-fondé de la méthode a finalement été illustré par le traitement d'hologrammes expérimentaux, ouvrant ainsi la voie à l'étude d'écoulements canalisés.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier du Programme Avenir Lyon Saint-Etienne de l'Université de Lyon, dans le cadre du programme "Investissements d'Avenir" (ANR-11-IDEX-0007).

## REFERENCES

[1] G. Tyler and B. Thompson, "Fraunhofer holography applied to particle size analysis a reassessment," J. Mod. Opt. **23**, 685-700 (1976).

- [2] C. Palma, and V. Bagini, “Extension of the Fresnel transform to ABCD systems,” *J. Opt. Soc. Am. A* **14**, 1931-1948 (1997).
- [3] N. Verrier, S. Coëtmellec, M. Brunel, and D. Lebrun, “Digital in-line holography in thick optical systems: application to visualization in pipes,” *Appl. Opt.* **47**, 4147-4157 (2008).
- [4] N. Verrier, C. Remacha, M. Brunel, D. Lebrun, and S. Coëtmellec, “Micropipe flow visualization using digital in-line holographic microscopy,” *Opt. Express* **18**, 7807-7819 (2010).
- [5] N. Verrier, C. Fournier, L. Mèès, and T. Fournel, “In-line particle holography with an astigmatic beam: setup self-calibration using an “inverse problems” approach,” *Appl. Opt.* **53**, G147-G156 (2014).
- [6] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, and C. Goepfert, “Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 1164-1171 (2007).
- [7] F. Soulez, L. Denis, E. Thiébaud, C. Fournier, and C. Goepfert, “Inverse problem approach in particle digital holography: out-of-field particle detection made possible,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**, 3708-3716 (2007).
- [8] C. Fournier, L. Denis, and T. Fournel, “On the single point resolution of on-axis digital holography,” *J. Opt. Soc. Am. A* **27**, 1856-1862 (2010).