



**HAL**  
open science

# SUPER RESOLUTION EN HOLOGRAPHIE NUMERIQUE POUR LA RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE HAUTE RESOLUTION D'HOLOGRAMMES

Corinne Fournier, Nicolas Verrier

► **To cite this version:**

Corinne Fournier, Nicolas Verrier. SUPER RESOLUTION EN HOLOGRAPHIE NUMERIQUE POUR LA RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE HAUTE RESOLUTION D'HOLOGRAMMES. 3ème rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2014, Ecully, France. hal-01112827

**HAL Id: hal-01112827**

**<https://hal.science/hal-01112827v1>**

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

# **SUPER RESOLUTION EN HOLOGRAPHIE NUMERIQUE POUR LA RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE HAUTE RESOLUTION D'HOLOGRAMMES**

Corinne Fournier, Nicolas Verrier

Université de Lyon, CNRS UMR-5516 Laboratoire Hubert Curien, Université de Saint-Etienne Jean Monnet, 18 rue Professeur Benoît Lauras, 42000 Saint-Etienne

[corinne.fournier@univ-st-etienne.fr](mailto:corinne.fournier@univ-st-etienne.fr), [nicolas.verrier@univ-st-etienne.fr](mailto:nicolas.verrier@univ-st-etienne.fr)

## **MOTS CLES**

Méthodes de reconstruction d'images, Métrologie, Problèmes Inverses, Super-résolution.

## **RESUME**

Nous proposons ici un algorithme de reconstruction par approche « problèmes inverses » d'une pile d'hologrammes d'objets. Celui-ci permet d'améliorer la résolution des hologrammes, et la précision de l'estimation de la position 3D et de la taille des objets holographiés. Les bénéfices de l'approche sont démontrés au travers du traitement d'hologrammes simulés et expérimentaux.

## **I. PROBLEMATIQUE**

L'holographie numérique est une méthode de diagnostic optique très populaire dans des domaines tels que l'imagerie biomédicale, le contrôle non-destructifs ou la mécanique des fluides. En effet, l'holographie permet d'enregistrer une information tridimensionnelle sur le milieu étudié à l'aide d'une seule image. Sa résolution temporelle, permet d'étudier des phénomènes tridimensionnels rapides. Les dernières générations de caméras rapides permettent d'atteindre des cadences de 10 000 hologrammes par seconde en pleine définition (un million de pixels). La précision de la reconstruction des hologrammes numériques a toujours été un enjeu. Celui-ci est d'autant plus important que les hologrammes présentent un mauvais rapport signal à bruit, que la résolution de la caméra d'acquisition est faible (cas des caméras rapides) ou que l'ouverture numérique est faible (la précision sur l'estimation de la position axiale des objets peut alors être d'un ordre de grandeur inférieure à celle sur l'estimation de la position transversale).

Les méthodes de super-résolution numériques, couramment utilisées en imagerie conventionnelle et appliquées à l'holographie ont montré leur potentiel pour l'amélioration de la restitution d'hologrammes numériques [1,2]. Ces approches permettent d'améliorer la résolution des hologrammes (diminution virtuelle de la taille des pixels) mais sont très sensibles à la présence d'objets statiques ou d'objets dans le champ ayant un mouvement différent de celui des objets d'intérêt. Elles nécessitent également de restituer les hologrammes obtenus.

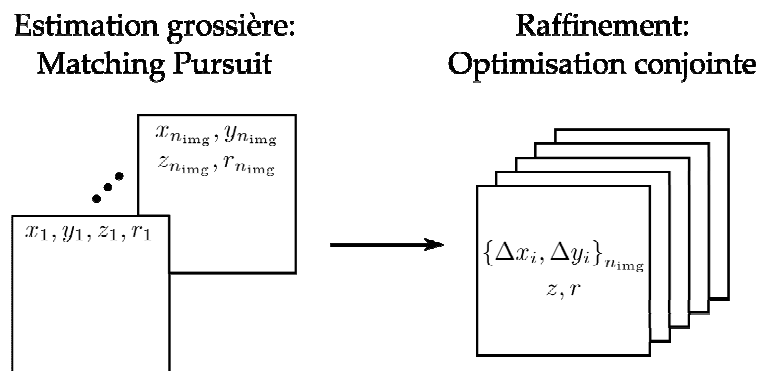
Récemment, l'utilisation d'approches « problèmes inverses » a été proposée pour la reconstruction d'hologrammes [3, 4, 5]. Plutôt que de refocaliser numériquement les objets étudiés, ces approches visent à trouver, au sens des moindres carrés, le modèle numérique le plus proche des données expérimentales. Dans le cas d'objets de formes simples, dont les

figures de diffraction peuvent être modélisées à l'aide d'un petit nombre de paramètres [3, 6], cette approche, est optimale d'un point de vue traitement du signal [7,8] et permet de concevoir des algorithmes non-supervisés.

Nous proposons d'utiliser le potentiel des approches inverses combinées aux méthodes de super-résolution. Le but étant d'améliorer la résolution en holographie numérique en exploitant la forte redondance d'information que l'on peut avoir dans une pile d'hologrammes d'une même scène.

## II. SUPER-RESOLUTION ET APPROCHE PROBLEMES INVERSES

L'algorithme de super-résolution par approche inverse proposé est une version modifiée de l'algorithme proposé par Soulez et al. [3] permettant de reconstruire une pile d'hologrammes en réalisant une estimation conjointe des différents paramètres des objets de la scène.



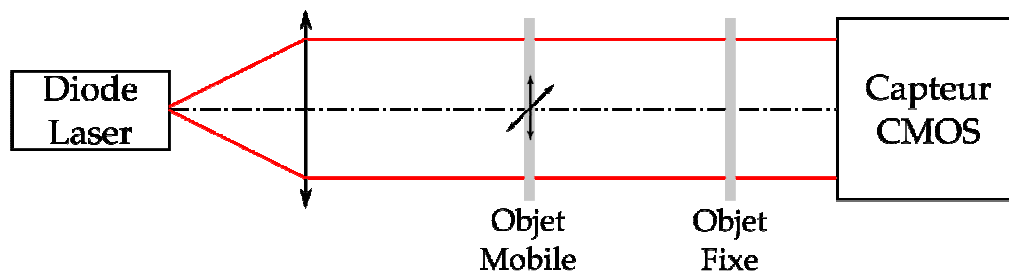
**Figure 1.** Synoptique de l'algorithme de super-résolution par approche inverse avec optimisation conjointe

Il comporte deux étapes illustrées Figure 1 :

- Une étape de détection globale (ou estimation grossière) au cours de laquelle on recherche, pour chaque hologramme de la pile, le meilleur accord entre les données et un dictionnaire de modèle de formation d'image (obtenus par un échantillonnage discret de l'espace des paramètres).
- Une étape d'optimisation conjointe qui permet de raffiner la mesure en ajustant le modèle paramétrique de formation d'image sur l'ensemble des hologrammes.

Cet algorithme peut être utilisé de manière itérative si plusieurs objets doivent être détectés.

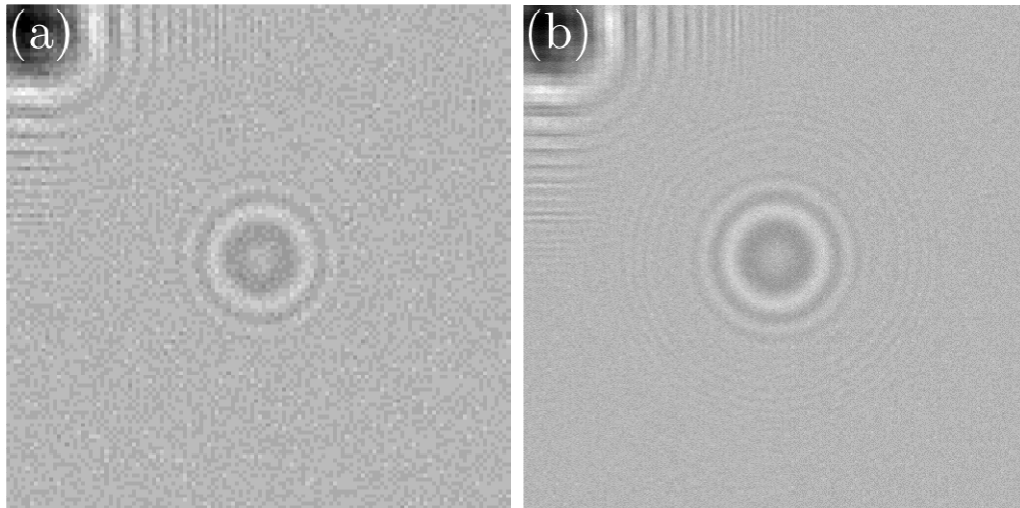
## III. APPLICATION : SUPER-RESOLUTION D'HOLOGRAMMES SIMULES ET EXPERIMENTAUX



**Figure 2.** Dispositif expérimental d'holographie en ligne pour la super-résolution

La configuration expérimentale considérée pour les simulations et l'expérience test est proposé Figure 1. Il s'agit d'un dispositif d'holographie en ligne conventionnel. L'échantillon étudié est composé de deux objets : un objet fixe (quelconque) et un objet mobile (disque

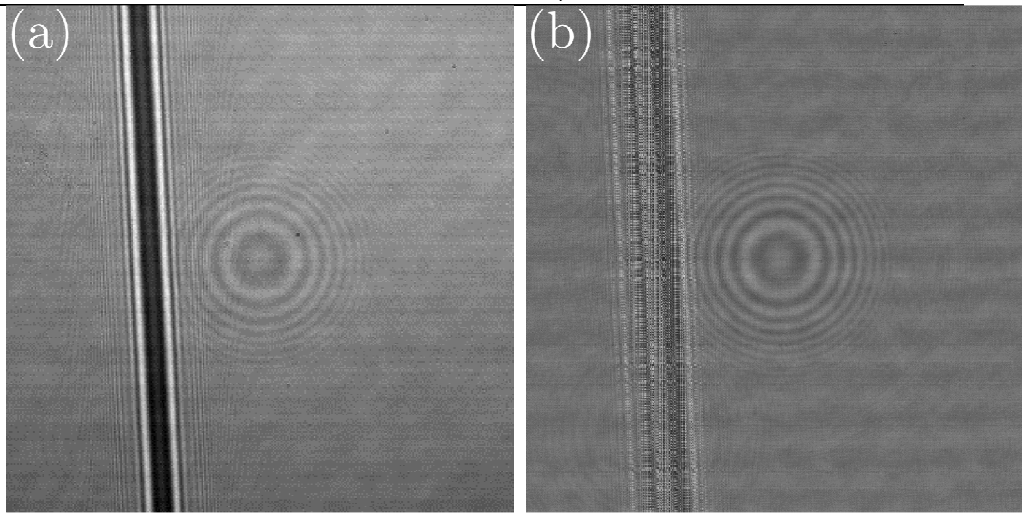
opaque) que l'on cherche à caractériser avec une grande précision. Ces conditions permettent de se placer dans le cas où l'on cherche à super-résoudre un hologramme d'objets se déplaçant dans un environnement fixe. Dans ce cas les approches de super-résolution classiques ne permettent pas d'obtenir des résultats satisfaisants. Pour pouvoir réaliser la super-résolution, une pile de  $n_{\text{img}} = 20$  images est enregistrée. La super-résolution est ensuite réalisée par optimisation conjointe des paramètres de l'objet étudié sur ces 20 images.



**Figure 3.** Illustration de la super-résolution sur un hologramme simulé. (a) Hologramme basse résolution (zoom sur 128x128 pixels). (b) Hologramme super-résolu d'un facteur 4 (zoom sur 512x512 pixels) pour illustration.

La validation de l'approche est réalisée à partir de la simulation de l'hologramme d'une particule opaque de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre ayant un mouvement sub-pixel aléatoire d'un hologramme à l'autre. L'objet fixe est un carré opaque. L'optimisation conjointe permet d'estimer très précisément le décalage de l'objet d'une image à l'autre ainsi que la distance axiale et le diamètre de l'objet. Dans le seul but d'illustrer l'amélioration du rapport signal à bruit et du contenu hautes fréquences spatiales, un hologramme super-résolu a été calculé. Pour cela, les images sont recalées en fonction des décalages estimés et interpolées du facteur désiré. L'hologramme super-résolu est calculé en sommant la pile d'images obtenue. Un exemple est proposé Figure 3. Les hologrammes basse résolution (1024x1024 pixels) sont simulés en accord avec le dispositif expérimental de la Figure 2. Un zoom sur 128x128 pixels est proposé Figure 3(a), et son équivalent super-résolu d'un facteur 4 est illustré Figure 3(b).

Ce résultat est confirmé Figure 4. Une série de 20 hologrammes d'un disque opaque calibré de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre en mouvement permet la super-résolution de l'hologramme. L'objet fixe présent sur les hologrammes de la Figure 4 est un cheveu. L'un des hologrammes basse résolution est présenté Figure 4(a) et son équivalent haute résolution est présenté Figure 4(b). Une nouvelle fois, le rapport signal à bruit de l'hologramme est amélioré, et son contenu en hautes fréquences spatiales est augmenté. Il est de plus à noter que de par le procédé utilisé pour la super résolution, l'influence de l'objet fixe est diminuée menant à des mesures plus précises des paramètres de l'objet mobile.



**Figure 4.** Illustration de la super-résolution sur un hologramme expérimental. (a) Hologramme basse résolution (zoom sur 320x320 pixels). (b) Hologramme super-résolu d'un facteur 4 pour illustration.

## CONCLUSION

L'utilisation de méthodes de reconstruction d'hologrammes basées sur les approches problèmes inverses a été étendue au traitement de piles d'images. Ainsi, il a été possible de proposer un algorithme de super-résolution basé sur une optimisation conjointe des paramètres d'un objet sur une séquence d'image. Le bénéfice de la méthode a été illustré au travers de la super-résolution d'hologrammes simulés et expérimentaux, démontrant le gain en hautes fréquences spatiales et en rapport signal à bruit des hologrammes obtenus. Ce travail sera publié dans *Optics Letters* [9].

## 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).

## RÉFÉRENCES

- [1] W. Bishara, T-W. Su, A. F. Coskun, and A. Ozcan, "Lensfree on-chip microscopy over a wide field-of-view using pixel super-resolution," *Opt. Express* **18**, 11181-11191 (2010).
- [2] O. Mudanyali, E. McLeod, W. Luo, A. Greenbaum, A. F. Coskun, Y. Hennequin, C. P. Allier, A. Ozcan, "Wide-field optical detection of nanoparticles using on-chip microscopy and self-assembled nanolenses," *Nat. Photonics* **7**, 247-254 (2013).
- [3] F. Soulez, L. Denis, C. Fournier, E. Thiébaud, and C. Goepfert, "Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization," *JOSA. A* **24**, 4, (2007).
- [4] L. Denis, D. Lorenz, E. Thiébaud, C. Fournier, et D. Trede, « Inline hologram reconstruction with sparsity constraints. », *Optics Letters*, **34**, 22, 3475- 3477, (2009).
- [5] A. Bourquard, N. Pavillon, E. Bostan, C. Depeursinge, et M. Unser, « A practical inverse-problem approach to digital holographic reconstruction », *Optics Express*, **21**, 3, 3417-3433, (2013).
- [6] S. H. Lee, Y. Roichman, G. R. Yi, S. H. Kim, S. M. Yang, A. van Blaaderen, P. van Oostrum, et D. G. Grier, « Characterizing and tracking single colloidal particles with video holographic microscopy », *Optics Express*, **15**, 26, 18275-18282, (2007).
- [7] 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).
- [8] K. I. Mortensen, L. S. Churchman, J. A. Spudich, and H. Flyvbjerg, "Optimized localization analysis for single molecule tracking and super-resolution microscopy," *Nat. Methods* **7**, (2010).
- [9] N. Verrier et C. Fournier, « Digital holography super-resolution for accurate three dimensional reconstruction of particle holograms », accepté pour publication dans *Optics Letters* le 11 novembre 2014.