



HAL
open science

HOLOGRAPHIE NUMERIQUE STOCHASTIQUE POUR LA VISUALISATION DES OBJETS TRANSPARENTS FORTEMENT REFRACTANT

Jean-Michel Desse, Pascal Picart

► **To cite this version:**

Jean-Michel Desse, Pascal Picart. HOLOGRAPHIE NUMERIQUE STOCHASTIQUE POUR LA VISUALISATION DES OBJETS TRANSPARENTS FORTEMENT REFRACTANT. 3ème rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2014, Ecully, France. hal-01112758

HAL Id: hal-01112758

<https://hal.science/hal-01112758v1>

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.

HOLOGRAPHIE NUMERIQUE STOCHASTIQUE POUR LA VISUALISATION DES OBJETS TRANSPARENTS FORTEMENT REFRACTANT

Jean-Michel Desse

ONERA, the French Aerospace Lab, 5, Bld Paul Painlevé, 59045 Lille Cedex
Jean-Michel.Desse@onera.fr

Pascal Picart

LUNAM Université du Maine, CNRS UMR 6613, LAUM, Avenue Olivier Messiaen, 72085 Le Mans
Cedex 9
pascal.picart@univ-lemans.fr

MOTS CLES

Holographie numérique ; Interférométrie holographique en temps réel ; Holographie en temps réel ; Mesure de phase.

RESUME

Ce papier présente une méthode d'holographie numérique pour la visualisation et la mesure des variations d'indice de réfraction, des courants de convection ou des gradients thermiques, se produisant à l'intérieur d'un objet transparent fortement réfractant. Le principe est validé par la visualisation des variations d'indices de réfraction à l'intérieur d'une ampoule lors de la mise sous tension. Une comparaison est faite avec les résultats obtenus en interférométrie holographique utilisant des plaques holographiques en transmission et en réflexion.

I. INTRODUCTION

La visualisation des écoulements à l'intérieur d'un objet transparent mais fortement réfractant reste encore un problème peu abordé. Par exemple, les objets comme une boule ou un flacon en verre, une ampoule ne sont pas opaques mais ils réfractent fortement la lumière et la mesure à l'intérieur n'est pas simple. Il en ressort que l'observation des phénomènes, tels que les variations d'indice de réfraction, les courants de convection ou les gradients thermiques se produisant à l'intérieur des objets requiert des méthodes optiques spécifiques. Différentes méthodes expérimentales sont couramment utilisées pour analyser et/ou mesurer la dynamique des écoulements dans le domaine de la mécanique des fluides [1-3]. Néanmoins, ces approches sont appropriées lorsque l'enveloppe comprenant l'écoulement est relativement lisse et transparent (c'est-à-dire : la réfraction n'est pas très forte). Une méthode expérimentale appropriée doit être capable de mesurer des changements de phase à l'intérieur de l'objet sans aucune déformation de l'image. Cet article propose une approche expérimentale basée sur l'holographie numérique stochastique pour étudier les flux à l'intérieur d'une enveloppe fortement réfractant. Elle conduit à obtenir une mesure quantitative du changement de phase à l'intérieur de l'objet. Les résultats expérimentaux sont fournis dans le cas de la visualisation de la variation d'indice de réfraction à l'intérieur d'une ampoule.

2. MÉTHODE OPTIQUE PROPOSÉE

L'approche qui peut être tout à fait adaptée pour visualiser l'intérieur d'un objet fortement réfractant est décrite sur la Figure 1. Le capteur comprend $N \times M = 1\ 920 \times 1\ 440$ pixels de dimension $p_x = p_y = 3,65\ \mu\text{m}$. La principale caractéristique du montage optique est que le diffuseur est placé derrière l'objet pour l'illuminer avec un éclairage stochastique. Le montage optique présente une certaine similitude par rapport au montage de microscopie à transmission classique, bien qu'aucun objectif de microscope n'est utilisé et l'onde d'éclairage est une onde speckle. Une lentille à distance focale négative est placée juste devant le cube séparateur pour réduire la distance de l'objet imagé par cette lentille. Cela conduit à un système optique beaucoup plus compact par rapport à un montage sans lentille négative. Par exemple, pour une taille d'objet comprise entre 10 et 15 cm, la distance d_0 sur la Figure 1 doit être supérieure à 2 m. L'utilisation de la lentille négative produit une image réduite de l'objet, dont la position est rapprochée du capteur [4,5]. Ainsi, la distance qui doit être utilisée dans l'algorithme est $d'_0 \ll d_0$ (voir Fig. 1). L'optimisation du montage hors d'axe doit suivre les règles de base et respecter notamment les conditions de Shannon [6].

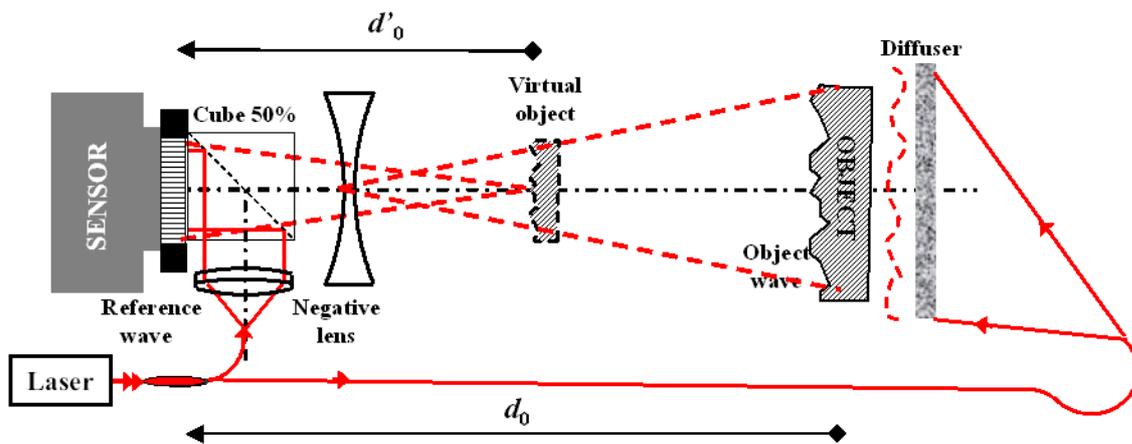


Figure 1: Montage d'holographie numérique stochastique

En particulier, la longueur focale de la lentille doit être judicieusement choisie. Spécialement, le critère qui est l'angle d'observation sur le capteur, doit remplir la condition suivante:

$$\theta_{\max} = -\frac{\lambda}{(4 - 2\alpha)\max(p_x, p_y)} \quad (1)$$

où α est la tolérance admise pour la superposition de l'ordre +1 utile et l'ordre 0. Dans cet article, le diffuseur (considéré ici comme un "écran diffusant") a une dimension de 10 cm par 20 cm et la tolérance de superposition ($\alpha = 20\%$) est admise. L'évaluation de la distance et de la longueur focale conduit à $d_0 = 800\ \text{mm}$, $d'_0 = 100\ \text{mm}$ avec $f = -150\ \text{mm}$ (les équations ne sont pas données ici). Les hologrammes peuvent être reconstruits par la méthode de convolution à grandissement variable décrite dans la référence [7] ou par la transformation discrète de Fresnel [3,4,6].

Après la reconstruction de l'amplitude complexe dans le plan de l'objet virtuel, une image d'amplitude et une image de phase peuvent être calculées. L'image d'amplitude est liée à l'image de l'objet donnée par la lentille, tandis que l'image de phase est utilisée pour obtenir les variations de l'indice de réfraction, les courants de convection, ou des gradients thermiques, se produisant à l'intérieur de l'objet. Pour cela, on doit évaluer la différence de phase temporelle à des instants différents. Une mesure quantitative peut être obtenue après le déroulement des différences de phase. Etant donné que l'épaisseur optique est directement liée à la phase déroulée, l'indice de réfraction ainsi que la masse volumique peuvent être déterminés en utilisant la relation de Gladstone-Dale.

3. VALIDATION DU PRINCIPE

La méthode proposée prévoit d'être appliquée à la visualisation et l'analyse de petits jets d'air à l'intérieur d'un verre fondu à haute température au cours de son processus de fabrication. Mais comme cette étude est soumise à une certaine confidentialité, la méthode a été appliquée et validée pour visualiser les courants de convection à l'intérieur d'une ampoule lors de la mise sous tension. Les hologrammes ont été enregistrés à des instants différents pendant l'allumage. La Figure 2 montre les résultats préliminaires. La Figure 2(a) montre l'hologramme enregistré lorsque l'ampoule est éteinte et la Figure 2(b) montre l'image d'amplitude obtenue avec la transformée discrète de Fresnel. Dans la Figure 2(b), l'écran stochastique et l'ampoule peuvent être clairement observés. A noter également la légère superposition de l'ordre utile à l'ordre 0 ($\alpha \approx 0,2$). Les Figures 2(c) et 2(d) montrent respectivement les différences de phase modulo 2π et déroulées obtenues entre deux instants (lampe éteinte lampe allumée). Les « franges numériques » observées dans la Figure 2(c) présentent des variations d'indice de réfraction intégrées sur l'épaisseur du récipient en verre.

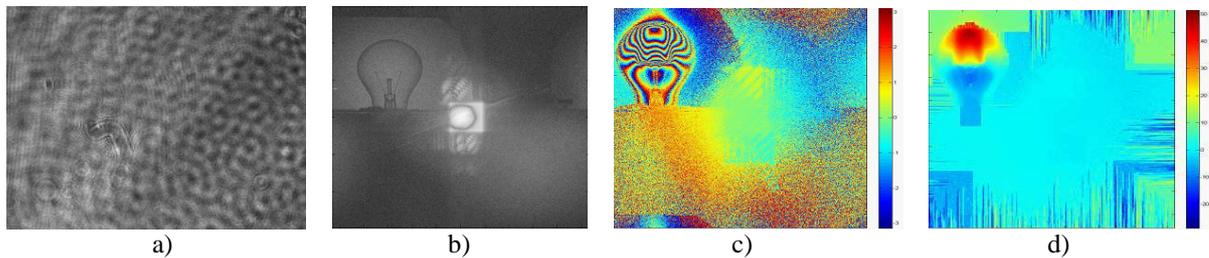


Figure 2: (a) Hologramme enregistré, (b) Image d'amplitude, (c) Différence de phase modulo 2π , (d) Différence de phase déroulée.

Ces résultats montrent que la configuration du montage optique est tout à fait adaptée pour la visualisation des phénomènes physiques qui se produisent à l'intérieur de l'ampoule lors de la mise sous tension. Par ailleurs, il faut noter que l'émission de lumière générée par l'ampoule allumée ne gêne en rien l'enregistrement de l'hologramme car il n'y a aucune perte d'information lors du traitement par transformée de Fresnel.

4. COMPARAISON AVEC L'INTERFEROMETRIE HOLOGRAPHIQUE SUR PLAQUES

Afin de vérifier la qualité des résultats obtenus avec la méthode d'holographie numérique proposée, deux montages d'interférométrie holographique en temps réel et utilisant des plaques holographiques ont été implémentés [8]. Les schémas optiques sont présentés sur la Figure 3, ils peuvent utiliser des plaques holographiques en transmission ou en réflexion. La Figure 3(a) montre le mode en transmission car la plaque holographique enregistre les interférences entre une onde de référence divergente et la lumière diffractée par le verre dépoli sur le même côté de la plaque. Par contre, pour l'holographie en réflexion présentée sur la Figure 3(b), l'onde de référence et l'onde de mesure impactent la plaque de part et d'autre. A noter que les montages nécessitent l'utilisation de plaques photographiques à très haute résolution spatiale obtenue par la dimension des grains d'argent de la gélatine qui est de l'ordre de 8 nm, ce qui permet d'obtenir une résolution spatiale d'environ 8000 mm^{-1} [9]. Dans les deux montages, un verre dépoli (diffuseur) est placé juste devant l'objet pour éclairer celui-ci avec une multitude de sources lumineuses aléatoires.

Le processus est le suivant :

- enregistrement d'un hologramme de référence en transmission ou en réflexion,
- développement de la plaque dans un révélateur adéquat,
- blanchiment de la plaque dans une solution de sulfite de fer,
- rinçage dans des solutions d'alcool isopropyle,
- séchage,

- remise en place dans le montage de la plaque développée (exactement au même endroit qu'à l'enregistrement).

Il faut noter que l'efficacité de diffraction de la plaque holographique ne dépasse pas 10 à 15% en transmission tandis qu'elle peut atteindre 100% en réflexion, ce qui constitue dans ce cas, un véritable miroir holographique. Ensuite, la caméra est réglée pour faire la mise au point sur l'objet, ici, c'est le filament de l'ampoule qui a été choisi lorsque l'ampoule est éteinte. Lors de la mise sous tension de la lampe, on peut visualiser en temps réel les courants de convection intégrés dans toute l'enveloppe de l'ampoule et filmer le phénomène à la cadence adéquate. Il faut noter que la présence d'un diaphragme placé juste devant la caméra permet de s'affranchir de la lumière émise et diffusée par la lampe (le diaphragme n'est pas représenté sur la Figure 3).

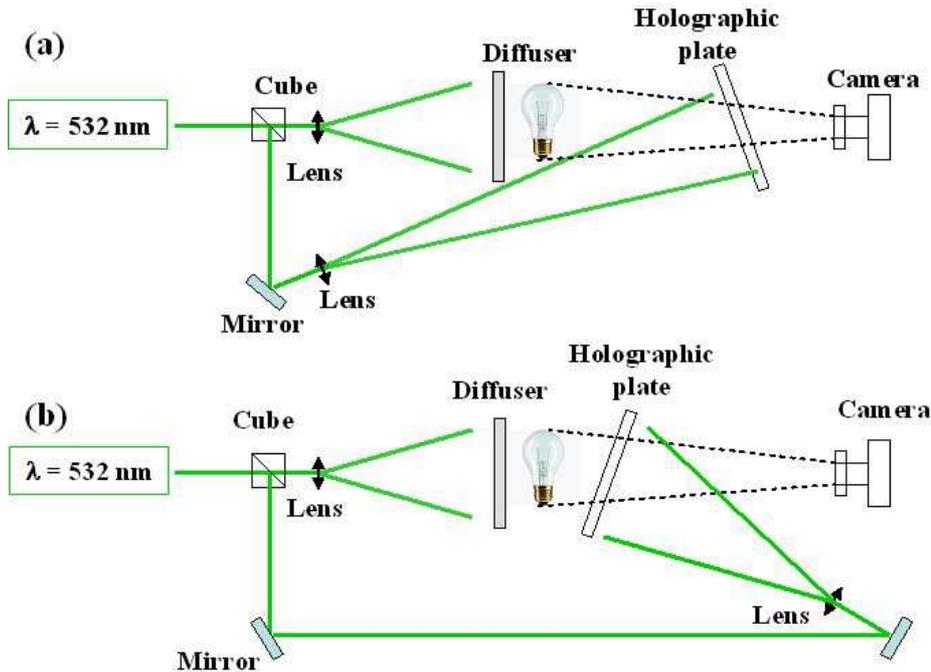


Figure 3: (a) interférométrie holographique en transmission, (b) interférométrie holographique en réflexion.

Enfin, il est connu que l'interférométrie holographique utilisant des plaques visualise l'intensité lumineuse des franges d'interférences et si on veut effectuer une comparaison avec l'interférométrie holographique numérique, il faut recalculer l'intensité lumineuse à partir de la phase obtenue en holographie numérique. La Figure 4 montre une comparaison entre les résultats obtenus avec l'holographie numérique et ceux obtenus avec l'holographie analogique. La Figure 4(a) montre une image obtenue lors du changement de phase mesuré par holographie numérique, après le calcul de l'intensité suivant la relation suivante :

$$I_{\lambda} = A(1 + \cos(\Delta\phi)) \quad (2)$$

où $\Delta\phi$ est le changement de phase et A l'amplitude de l'image.

La Figure 4(b) visualise les franges d'interférence obtenues par la mise en place du montage d'interférométrie holographique en transmission de la Figure 3(a) et la Figure 4(c), celle qui a été enregistrée avec le montage en réflexion (Fig. 3(b)). On voit qu'un très bon accord peut être observé. En outre, la qualité de l'image donnée par chaque procédé peut être appréciée. Il est évident que l'interférométrie holographique analogique fournit la meilleure résolution spatiale : le filament de la lampe peut être clairement vu dans les Figure 4(b) et 4(c). Cependant, l'holographie numérique est plus souple car aucun traitement chimique n'est nécessaire et on obtient directement une image de phase.

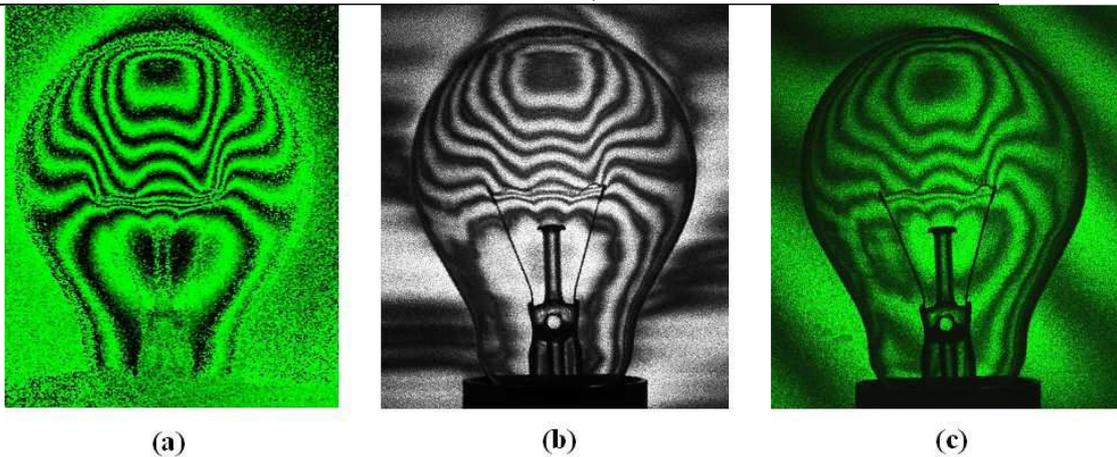


Figure 4: Comparaison entre l'intensité lumineuse des franges d'interférence, (a) franges calculées par holographie numérique, (b) franges obtenues en interférométrie holographique par transmission, (c) franges obtenues en interférométrie holographique par réflexion.

On peut comparer la résolution spatiale des deux méthodes :

- En holographie numérique, la résolution spatiale r_s qui dépend de la longueur d'onde $\lambda = 532\text{nm}$, de la distance de reconstruction $d'_0 = 217\text{ mm}$, du nombre de pixel (1 920) et de la dimension du pixel ($3,65\ \mu\text{m}$) est donnée par la relation :

$$r_s = \frac{\lambda \cdot d'_0}{N \cdot p_x \cdot \gamma_{opt}} \quad (3)$$

où γ_{opt} est le grandissement transversal donné par la lentille négative, ici $\gamma = 0,2$. L'application numérique donne une résolution spatiale égale à 82,3 microns.

- En interférométrie holographique par transmission ou par réflexion, l'image diffractée par l'hologramme possède une très haute résolution spatiale (plusieurs dizaines de milliers de lignes par millimètre). C'est donc la résolution du capteur qui fixe la résolution de l'image, soit 274 lignes par mm ($1/3,65\ \mu\text{m}$) dans le plan du capteur, ce qui, projeté dans le plan de l'objet (grandissement de 1/12,5), donne une résolution de 45,6 microns.

On voit donc que les images enregistrées par l'holographie à plaques ont une meilleure résolution, mais seulement d'un rapport 2 environ. La figure 2b, image de l'objet reconstruit par l'holographie de Fresnel, en est une bonne illustration, car on perçoit correctement le filament de l'ampoule.

5. CONCLUSION

En conclusion, ce papier propose une méthode d'holographie numérique pour visualiser et mesurer les variations de l'indice de réfraction, des courants de convection ou des gradients thermiques, se produisant à l'intérieur d'un objet transparent, mais fortement réfractant. La validité du principe et du montage optique est montrée par les cartes de phase et d'amplitude obtenue par holographie de Fresnel.

L'utilisation d'une lentille de focale divergente permet de rapprocher l'objet du capteur à l'enregistrement. Lors de la reconstruction de l'amplitude de l'objet, celui-ci est mis au point en utilisant une distance de reconstruction adéquate. Ainsi, les variations de l'indice de réfraction calculées à partir des cartes de phase, peuvent être visualisées à l'intérieur d'une ampoule lors de sa mise sous tension.

Enfin, des comparaisons ont été réalisées avec des montages d'interférométrie holographique utilisant des plaques holographiques en transmission et en réflexion. La comparaison, effectuée sur l'intensité lumineuse des franges d'interférences, montre que l'holographie numérique fournit des cartes d'amplitude et de phase de très bonne qualité, ce qui rend la méthode optique très concurrentielle,

même si la résolution spatiale est un peu moins bonne que celle obtenue avec l'interférométrie holographique traditionnelle.

REFERENCES

- [1] Desse, J.M., Picart, P., & Tankam, P. (2008). Digital three-color holographic interferometry for flow analysis. *Opt. Express* **16**, 5471-5480.
- [2] T. Kakue, T., Yonesaka, R., Tahara, T., Awatsuji, Y., Nishio, K., Ura, S., Kubota, T., & Matoba, O. (2011). High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography. *Opt. Lett.* **36**, 4131-4133.
- [3] Desse, J.M., Picart, P., & Tankam, P. (2012). Digital color holography applied to fluid and structural mechanics. *Opt. Lasers Eng.* **50**, 18-28.
- [4] Schnars, U., Kreis, T.M., & Jüptner, W.O. (1996). Digital recording and numerical reconstruction of holograms: reduction of the spatial frequency spectrum. *Opt. Eng.* **35**, 977-982.
- [5] Mundt, J., & Kreis, T.M. (2010). Digital holographic recording and reconstruction of large scale objects for metrology and display. *Opt. Eng.* **49**, 125801-1-6.
- [6] Picart, P., & Leval, J. (2008). General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography. *JOSA A* **25**, 1744-1761.
- [7] Li, J.C., Tankam, P., Peng Z., & Picart, P. (2009). Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification. *Opt. Lett.* **34**, 572-574 (2009).
- [8] Desse, J.M., & Tribillon, J.L. (2009). Real-time three-color reflection holographic interferometer. *Appl. Opt.* **48**, 36, 6870-6877.
- [9] Gente, Y. The ultimate holography. <http://www.ultimate-holography.com/>