Description des images holographiques de bulles : influence des caractéristiques expérimentales du système d'enregistrement

Stanislas Grare, Daniel Allano, G. Gréhan, S. Coëtmellec, D. Lebrun
UMR 6614 CORIA, LABEX EMC3, Avenue de l'Université, Université de Rouen,
76801 Saint-Etienne du Rouvray
Stanislas.Grare@coria.fr

Benoît Lebon, Gaële Perret, Jerôme Brossard,
Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), UMR 6294 CNRS, 76600, Le Havre

MOTS CLES

Hydrodynamique, Holographie dans l'axe, Métrologie de bulles, Cohérence temporelle

RESUME

L'holographie numérique de Gabor est utilisée pour caractériser les tourbillons qui se forment au voisinage d'objets immergés. Pour cela, nous étudions les trajectoires de bulles qui se forment à proximité d'une plaque métallique plongée dans un canal à houle. Afin de définir au mieux les traitements numériques à appliquer aux images holographiques, nous modélisons les hologrammes générés dans la configuration expérimentale d'étude (diode laser modulée, caméra CMOS). Nous montrons que les différences observées entre hologrammes expérimentaux et modèle s'expliquent d'une part par les propriétés spectrales de la source d'éclairage, et d'autre part, par l'intégration spatiale des franges sur la surface des éléments photosensibles (pixels).

I. CONTEXTE

I.1 Etude des tourbillons

L'interaction de la houle avec une structure immergée (exemple des mâts d'éoliennes offshore) génère des filaments tourbillonnaires très intenses qui ont un fort impact sur leur environnement proche. Pour étudier cette dynamique, les tourbillons sont reproduits dans le canal à houle du LOMC (10x0,3x0,3m) au Havre. On considère le problème simplifié de l'interaction d'une houle régulière avec une plaque plane horizontale. Une étude réalisée au LOMC a mis en évidence des phénomènes d'éclatement tourbillonnaire qui déstabilisent ces tourbillons et qui sont par essence tridimensionnels.[1] Les traceurs utilisés ici sont des bulles générées par électrolyse d~[30-300µm]. Le suivi des trajectoires 3D de ces bulles s'effectue par holographie numérique « in-line »[2,3].

I.2 Hologrammes de trajectoires de bulles

La figure 1 schématise le système expérimental. Les bulles sont éclairées par un faisceau provenant d'une diode laser modulée. L'enregistrement des hologrammes en multiexposition (accumulation de *n* poses sur le même support numérique) permet de connaître la position 3D des bulles transportées dans les tourbillons et ainsi d'en déduire leurs trajectoires 3D.[4]

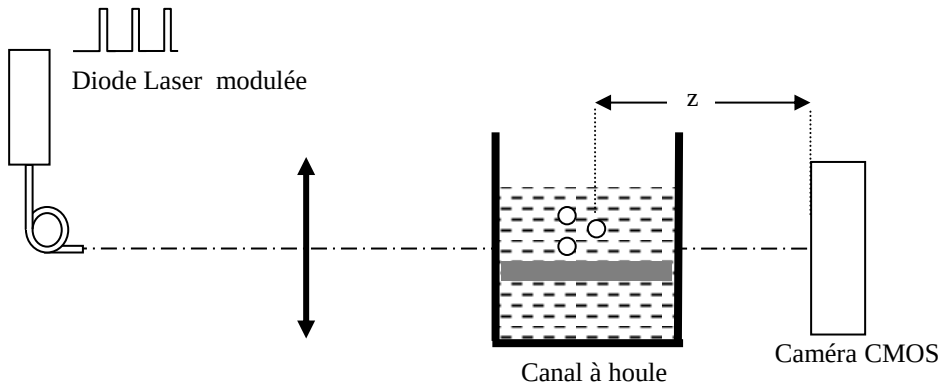
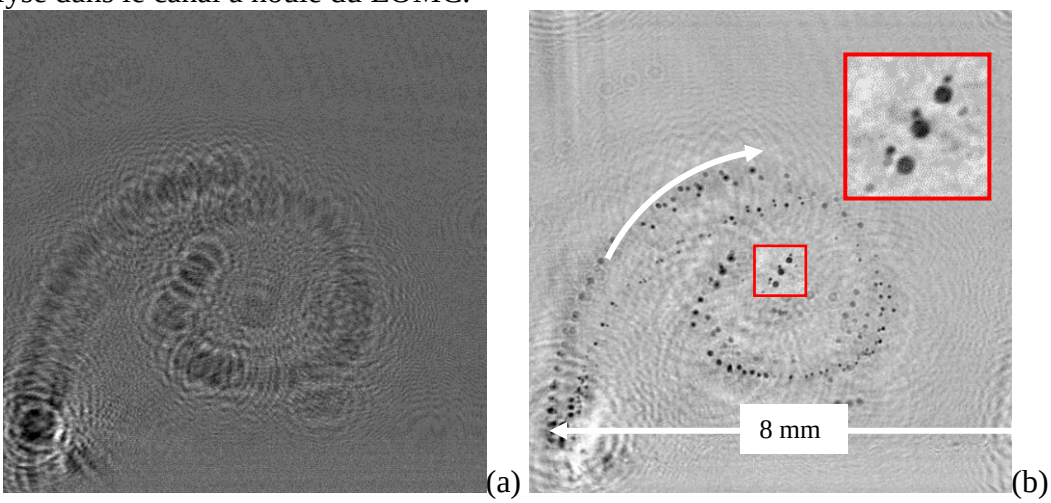


Figure 1 Schéma expérimental du montage d'enregistrement d'hologrammes de bulles au LOMC. Les tourbillons sont formés par l'introduction d'une plaque immergée dans le canal à houle.

L'image de la figure 2a montre un exemple d'hologramme (*1024*×*1024*) de bulles générées par électrolyse dans le canal à houle du LOMC.



(a) (b)

Figure 2 Exemple d'hologramme de bulles enregistré dans le canal à houle *n=3* expositions (a) Hologramme (b) Image restituée (z=99mm)

Dans cette expérience, l'ombre générée par la plaque immergée a été supprimée en normalisant l'hologramme par une moyenne des 100 hologrammes temporellement voisins (division des niveaux de gris). Les images restituées sur la figure 2(b) montrent qu'il est possible par extraction des coordonnées des images correspondant à chaque pose, de reconstituer les trajectoires 3D des bulles dans le tourbillon.[5]

II. DESCRIPTION DES HOLOGRAMMES

Afin de mettre en œuvre un algorithme de recherche de position 3D des bulles, il est nécessaire d'avoir une description approfondie des hologrammes. Nous avons donc simulé les hologrammes par la théorie rigoureuse de Lorenz-Mie (LMT) afin de prendre en compte les indices de réfraction respectifs de l'eau et des bulles ainsi que la géométrie des bulles que l'on assimilera à des sphères.[6]

La figure 3a montre la distribution d'intensité théorique d'un hologramme pour une bulle de diamètre $d=262\ \mu m$ enregistrée par une caméra située à $z= 96{,}3\ mm$ et dont les pixels ont une taille de $p=6{,}7\ \mu m$.

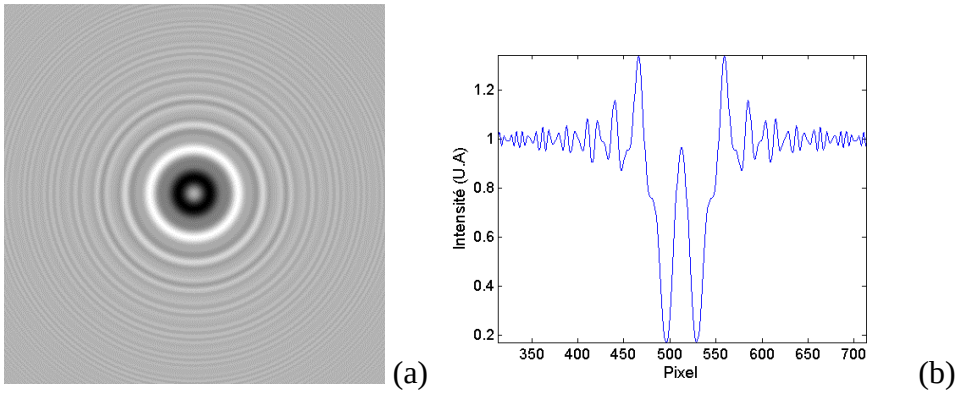


Figure 3: Simulation d'un hologramme de bulle par LMT. d=262 µm, z=96,3mm (a) Hologramme, (b) profil radial

La figure 4a montre l'image restituée de cet hologramme par transformation de Fresnel. En examinant le profil radial d'intensité de l'image, on peut remarquer la présence d'un pic central lumineux intense[7]. En revanche, comme le montre la figure 4b, ce pic d'intensité n'est pas présent sur l'image restituée provenant d'un hologramme expérimental d'une bulle d'eau d'un diamètre identique. Cette observation a pu être généralisée à l'ensemble des bulles de grande taille observées lors des expériences menées sur le canal à houle. Concernant les bulles dont le diamètre est inférieur à 120µm, aucun pic central n'a été observé.

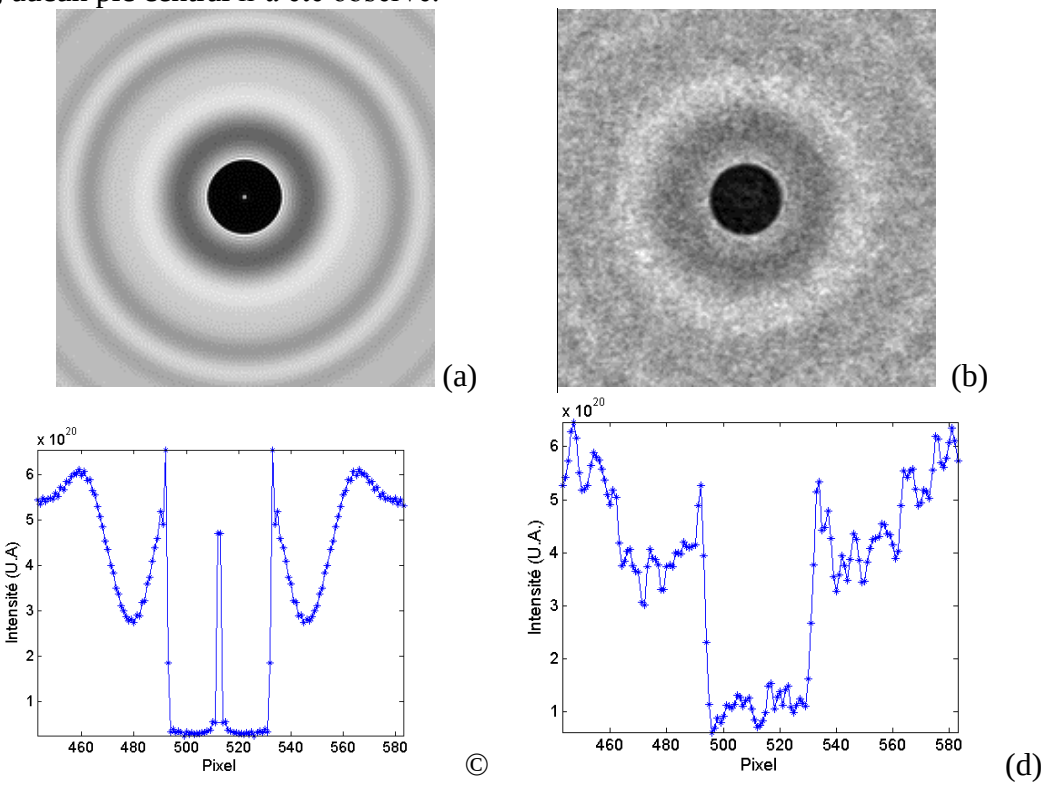


Figure 4: Image d'une bulle de diamètre d=262µm. z= 96,3 mm, (a) simulation (b) expérience (c) profil radial simulé, (d) profil radial expérimental

L'objet des sections qui suivent est d'identifier les causes qui peuvent expliquer le désaccord entre simulations et résultats expérimentaux. En particulier, on évaluera l'influence des caractéristiques du système d'enregistrement (source et détecteur).

III. PRISE EN COMPTE DES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME D'ENREGISTREMENT

Les hologrammes ont été simulés pour une distance particule-caméra z=125,3 mm correspondant, compte tenu du fait que le faisceau se propage dans l'eau, à un échantillonnage optimal par une caméra constituée de 1024 x 1024 pixels de taille p=6,7 µm.[8] Nous avons choisi une bulle de grande taille (d=200 µm) de manière à mieux mieux apprécier l'effet des différents paramètres (intégration spatiale et largeur spectrale de la source) sur le niveau du-pic central. On considère que la distribution spectrale des modes de la diode laser est répartie autour d'une valeur centrale λ=488nm.

III.1 Intégration sur la surface de l'élément photosensible

Dans de nombreuses études théoriques, les hologrammes sont souvent simulés sans tenir compte de l'intégration spatiale de l'éclairement incident sur la surface active des pixels. Or, l'opération de convolution introduite par la dimension des éléments photosensibles de la caméra joue un rôle important et peut permettre de comprendre l'écart observé entre théorie et expérience.[8]

Nous avons donc effectué une moyenne spatiale locale sur la dimension des pixels. Afin de tenir compte également des effets de diffusion des charges dans le semi-conducteur (diaphonie de diffusion ou cross-talk),[9] une moyenne pondérée des niveaux sur 4 valeurs a été calculée en considérant le plus proche voisinage des pixels. Les profils d'intensité de l'image restituée sans intégration et avec moyenne sur la surface du pixel (l'effet de cross-talk est pris aussi en compte) sont présentés respectivement sur les figures 5a. et 5b.

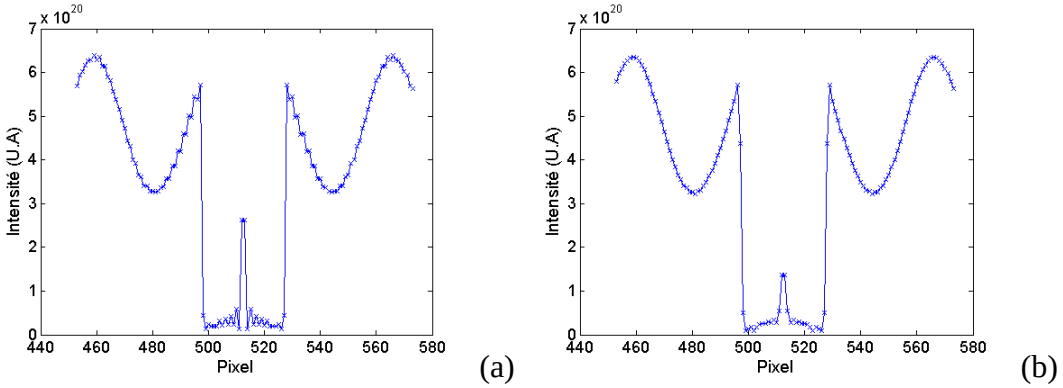


Figure 5: Distribution d'intensité radiale dans l'image restituée d'une bulle à partir d'un hologramme simulé par LMT. *d=200 µm, z=125,3 mm*.
(a) calcul brut (b) prise en compte de l'intégration sur la surface active de l'élément photosensible

On peut constater que l'intégration spatiale des franges joue un rôle dans l'affaissement du pic central. Cependant, elle ne permet pas d'expliquer à elle seule la différence simulations/expériences.

III.2 Effet de l'étendue spectrale de la source lumineuse

L'holographie de Gabor (configuration in-line) autorise l'utilisation de sources laser à faible cohérence[10]. En réduisant la bande-passante des figures holographiques, elle permet même parfois de s'affranchir des problèmes d'échantillonnage inhérents à l'utilisation des capteurs d'images discrets.[11,12] Dans cette étude, nous utilisons une diode laser (Oxxius LBX488) émettant à une longueur d'onde moyenne λ=488 nm. Afin de prendre en compte la largeur spectrale de la source laser utilisée, nous avons effectué une moyenne pondérée des distributions d'intensité de l'hologramme simulés sur différentes étendues spectrales. La figure 6 montre une comparaison entre une image restituée issue d'une simulation brute et une image restituée à partir d'un hologramme simulé en considérant la largeur spectrale de la source lumineuse.

Pour cet exemple, nous avons considéré une diode laser dont le spectre d'émission suit un profil gaussien avec une largeur à mi-hauteur Δλ=1,5 nm. On observe que les caractéristiques spectrales ont un effet prépondérant dans l'affaissement du niveau lumineux du pic central.

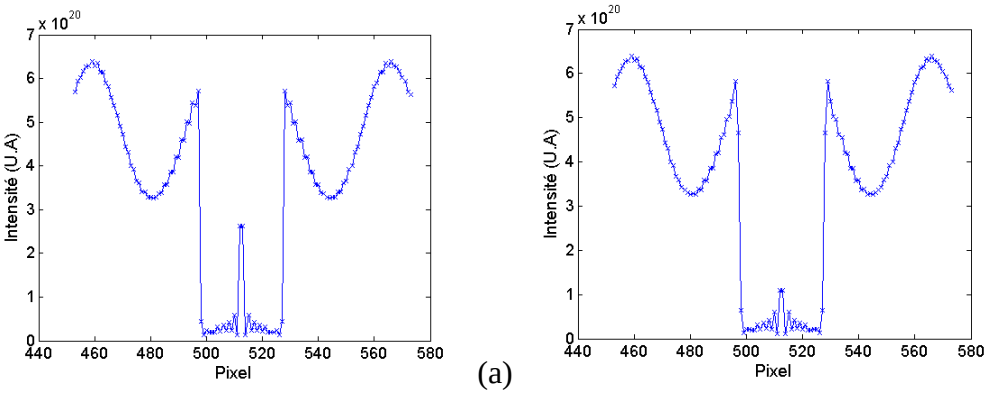


Figure 6: Distribution d'intensité radiale dans l'image restituée d'une bulle à partir d'un hologramme simulé par LMT. *d=200 µm, z=125,3 mm.*
(a) source monochromatique (b) largeur spectrale *Δλ=1,5 nm*

En effectuant ces simulations pour plusieurs spectres d'émission, nous avons constaté que l'affaissement du pic est de plus en plus important au fur et à mesure que la largeur spectrale augmente. La figure 7 montre l'évolution du rapport I_{pic}/I_{signal}, qui correspond au rapport entre l'intensité du pic central et l'intensité moyenne du signal, en fonction de la largeur spectrale de la source. Ces courbes mettent en évidence l'atténuation du pic central lorsque la largeur spectrale de la source augmente. Ce graphe montre aussi que pour un étalement spectral Δλ supérieur à *4nm* et lorsque l'on tient compte l'effet de l'intégration sur la surface du pixel, on observe une disparition quasi-totale du pic d'intensité. Pour ces valeurs, le profil d'intensité dans l'image holographique d'une bulle peut être assimilé à celui d'une particule opaque.

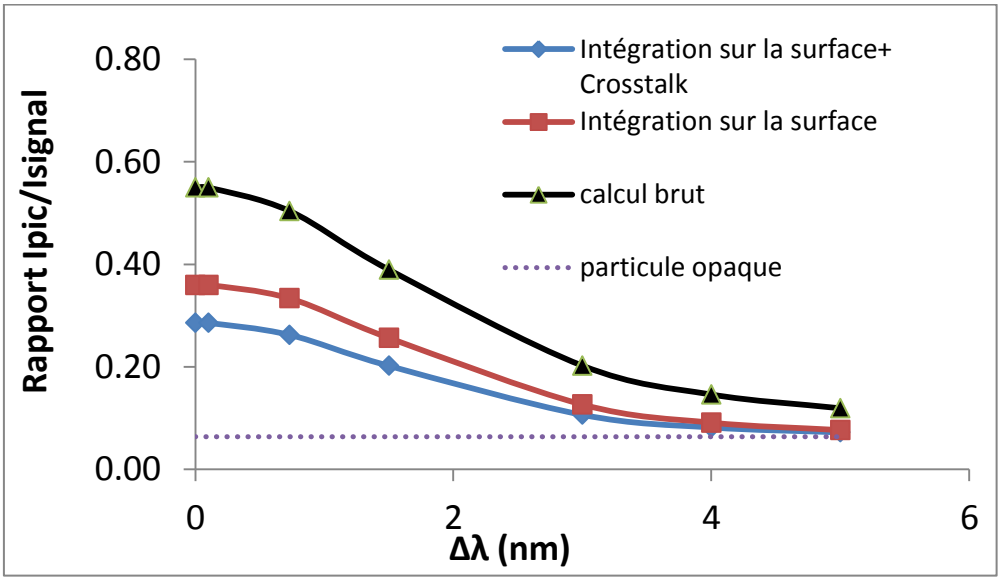


Figure 7: Evolution de l'intensité relative du pic central de l'image d'une bulle en fonction de la largeur spectrale de la source lumineuse avec et sans effet d'intégration sur la surface du pixel. *d=200 µm, z=125,3 mm*

Par conséquent, l'introduction des caractéristiques des pixels de la caméra et la prise en compte de l'étendue spectrale de la source laser permet d'expliquer en partie les différences observées entre théorie et expérience. En revanche, nous n'avons pas introduit l'effet d'intégration dû à la dimension spatiale de la source lumineuse (fibre monomode de diamètre de cœur 5 µm). Nous n'avons pas non plus étudié l'effet d'une éventuelle troncature des franges (bulle en bord de champ) qui pourrait aussi contribuer à une explication de la disparition du pic central.

CONCLUSIONS

Une étude approfondie des hologrammes de bulles par la théorie de Lorenz-Mie (LMT) met en évidence l'apparition d'un pic lumineux intense dans les images restituées. Or, ce pic d'intensité n'a pas été observé lors des différentes campagnes expérimentales réalisées au CORIA et dans le canal à houle du LOMC. Nous avons montré que les caractéristiques spectrales des sources lumineuses utilisées ainsi que l'intégration de la figure holographique sur la surface active des éléments photosensibles pouvait expliquer en partie les différences entre modèle et expérience. Notons que le cas que nous avons étudié (d=200 µm et z=125,3 mm) correspond à une situation où le pic central est particulièrement intense. Par conséquent, on pourra admettre que le pic d'intensité prévu par LMT n'est pas à prendre en compte lors de l'élaboration des logiciels de suivi de bulles en holographie subaquatique dans la mesure où la quasi-totalité des bulles ont un diamètre compris entre 30 et 100 µm.

REMERCIEMENTS

Cette étude est financée par le projet «Développement de Techniques optiques 3D pour écoulements complexes » du LABEX EMC3 (Energy, Materials and Clean Combustion Center), et la Région Haute Normandie.

REFERENCES

[1] Poupardin A, Perret G., Pinon G., Bourneton N., Rivoalen E. and Brossard J, (2012). « . Part I:experimental analysis, *Eur. J. Mech. B/Fluids*, **34** , 47-55

[2] C. Buraga, S. Coëtmellec, D. Lebrun and C. Özkul, "Application of wavelet transform to hologram analysis : three dimensional location of particles", Opt. and Lasers in Engineering, **33**, 409-421, (2000)

[3] L Denis, D Lorenz, E Thiébaut, C Fournier, D Trede, "Inline hologram reconstruction with sparsity constraints", Opt. Lett. **34** (22), 3475-3477, (2009)

[4] N. Salah, G. Godard, D. Lebrun, P. Paranthoën, D. Allano and S. Coëtmellec, (2008). "Application of multiple exposure digital in-line holography to particle tracking in a Benard-von Karman vortex flow", *Meas. Sci. and Tech.*, **19**, 074001

[5] Lebon B, Perret G., Grare S., Allano D., Godard G, Coëtmellec S., Lebrun D. et Brossard J. « Etude 3D de l'interaction houle-structure par holographie numérique », *14e congrès francophone de techniques laser* ,*CFTL* Marseille, 2014.

[6] X.Wu, S. Meunier-Guttin-Cluzel, Y.Wu, S. Saengkaew, D. Lebrun, M. Brunel, L. Chen, S. Coëtmellec, K. Cen, G. Gréhan, (2012)."Holography and micro-holography of particle fields: A numerical standard," *Optics Comm.* **285**, 3013-3020

[7] S. Coëtmellec, W. Wichitwong, G. Grehan, D. Lebrun, M. Brunel and A.J.E.M Janssen, "Digital In-line holography assessment for general phase and opaque particle", J. Eur. Opt. Soc. Rapid. Publi., Vol. 9 ,2014

[8] P. Picart, J. Leval, "General Theoretical Formulation of Image Formation in Digital Fresnel Holography", J.Opt.Soc..Am. A, **25**, 1744-1761 (2008).

[9] M. Estribeau, « Analyse et modélisation de la fonction de transfert de modulation des capteurs d'images à pixels actifs CMOS », thèse SUPAERO, (2004)

[10] F. Nicolas, S. Coëtmellec, M. Brunel, D. Lebrun, "Digital In-line holography with a sub-picosecond laser beam", Optics Communications, **268**, 27-33 (2006)

[11] F. Dubois, ML Requena, C. Minetti, O. Monnom, E. Istasse, "Partial spatial coherence effects in digital holographic microscopy with a laser source", App. Opt. 43, 1131-1139, (2004)

[12] F. Nicolas, S. Coëtmellec, M. Brunel, D. Lebrun, "Suppression of the moiré effect in sub-picosecond digital in-line holography", Opt. Express, Vol. 15, No. 3, 887-895, (2007)