



**HAL**  
open science

## Holographie numérique dans l'axe de particule et de bulle de gaz : modélisation et expérience

S. Coetmellec, W. Wichitwong, D. Pejchang, D. Allano, G. Gréhan, D. Lebrun, M. Brunel

► **To cite this version:**

S. Coetmellec, W. Wichitwong, D. Pejchang, D. Allano, G. Gréhan, et al.. Holographie numérique dans l'axe de particule et de bulle de gaz : modélisation et expérience. 3ème rencontre franco-phonie d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2014, Ecully, France. hal-01112833

**HAL Id: hal-01112833**

<https://hal.science/hal-01112833v1>

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 numérique dans l'axe de particule et de bulle de gaz : modélisation et expérience

S. Coëtmellec, W. Wichitwong, D. Pejchang, D. Allano, G. Gréhan, D. Lebrun, M. Brunel  
UMR 6614 CORIA, LABEX EMC3, Avenue de l'Université, Université de Rouen,  
76801 Saint-Etienne du Rouvray  
coetmellec@coria.fr

### MOTS CLES

Holographie dans l'axe, Inclusions, Métrologie de bulles

### RESUME

Nous montrons ici que la modélisation approchée 3D de particules (transparente ou opaque), ou de bulles de gaz est possible au moyen de la théorie scalaire de Fresnel. Cette modélisation au moyen des polynômes de Zernike pour obtenir l'expression mathématique de la distribution d'intensité est comparée à la théorie rigoureuse de Lorenz-Mie (LMT). A partir de cette modélisation, lors de la restitution par transformation de Fourier fractionnaire (FRFT) de l'image de la particule ou de la bulle, un spot lumineux dans l'image restituée est mis en évidence que ce soit du point de vue la théorie rigoureuse comme de la théorie scalaire.

### I. CONTEXTE

#### I.1 Motivations

Pendant longtemps les particules sphériques comme les bulles qui ensemencent les écoulements étaient interprétés comme des disques opaques dans les développements théoriques en holographie dans l'axe. Par conséquent, une particule solide ne peut être différenciée d'une bulle de gaz. Les indices de l'objet ne sont également pas pris en compte, ... Cette incapacité à distinguer une bulle d'une particule a posé des problèmes, par exemple, dans l'analyse de distribution de taille de bulles lors d'une étude de la cavitation en tunnel hydrodynamique. De plus, le modèle de simulation par LMT montrait un spot lumineux au centre de l'image restituée dans le cadre de l'holographie numérique dans l'axe. Chose qui n'apparaissait dans nos restitutions. Il a donc été nécessaire de revisiter nos modèles pour résoudre cette différence.

#### I.2 Différents dispositifs holographiques de simulation et d'expérience

De manière générale et indépendamment de l'objet, un montage holographique dans l'axe se résume à deux matrices ABCD : une sur le versant incident de l'onde sur l'objet et l'autre en aval de l'objet jusqu'au capteur. La figure (1) illustre le contexte.

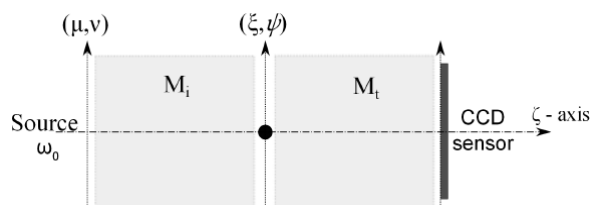


Figure 1 Schéma de principe d'un montage d'holographie dans l'axe.

Le calcul de la distribution d'intensité est réalisé au moyen de l'intégrale de Fresnel généralisée [1]. Sur la figure (1) est représenté un point noir qui peut être soit une particule (transparente ou opaque) soit une bulle de gaz. Une première représentation mathématique commune aux deux objets cités plus haut est celle qui consiste à faire l'approximation lentille mince telle :

$$p(s, \theta) = [1 - e^{-i\pi k s^2}] Z_0^0(s, \theta) \quad (1)$$

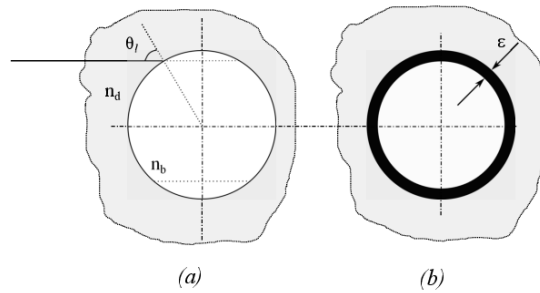
Où  $p$  représente la fonction de transfert de l'objet,  $s$  la coordonnée radiale et  $\theta$  la coordonnée angulaire et  $Z_0^0$  l'ouverture de l'objet, c'est-à-dire son diamètre normalisé. Une seconde représentation mathématique possible est l'approximation dite quasi-sphérique telle que

$$p(s, \theta) = [1 - \exp(i\pi K \sqrt{1 - c^2 s^2})] Z_0^0(s, \theta) \quad (2)$$

avec  $c=n/n_i$  l'ouverture numérique,  $0 < c < 1$ ,  $n$  l'indice du milieu et  $n_i$  l'indice de l'objet. Les fonctions définies par les Eqs (1) et (2) peuvent être décomposées sur la base des fonctions circulaires telles

$$p(s, \theta) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n^0 \cdot Z_n^0(s, \theta), \quad Z_n^0(s, \theta) = R_n^{|m|}(s) \cdot e^{im\theta} \quad (3)$$

où  $\gamma_n^0$  est le coefficient de décomposition et  $R_n^{|m|}(s)$  le polynôme de Zernike. Son expression dans le cas de l'approximation lentille mince et dans le cas de l'approximation quasi-sphérique est donnée dans [1]. Néanmoins la définition des coefficients de décomposition  $\gamma_n^0$  est valable lorsque l'onde se propage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent. Hors, dans le cas d'une bulle d'air, c'est le contraire. Il apparait un angle limite où se produit, au sens de l'optique géométrique, une réflexion totale. Dans notre approximation, cette zone de réflexion totale sera considérée opaque telle que l'illustre la figure (2).



**Figure 2** : schéma de principe d'une bulle d'air considéré dans l'approximation scalaire.

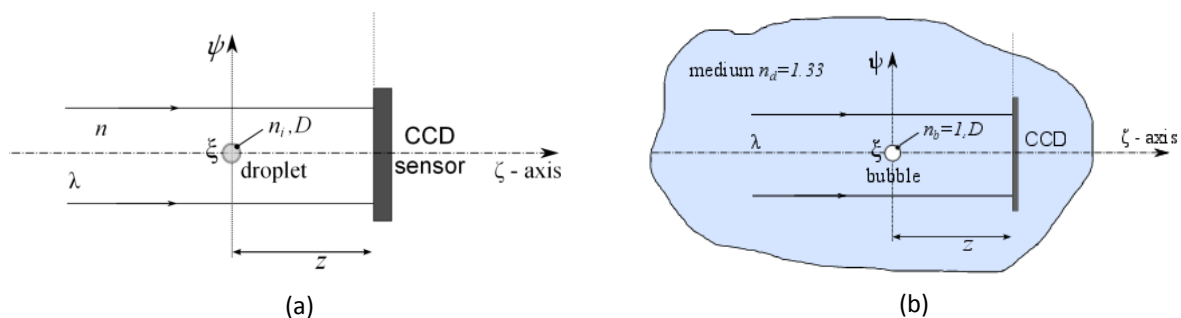
Il y a donc, illustré sur la figure (2), une réduction de l'ouverture de la pupille d'une quantité  $\epsilon = nb/nd$ . Les coefficients de décomposition  $\gamma_n^0$  doivent donc intégrer dans leurs expressions l'effet de cette réduction. Dans le cas de bulle d'air, les fonctions de transfert seront notées comme suit :

$$p_\epsilon(s, \theta) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} I_n^0(\epsilon) \cdot Z_n^0(s, \theta), \quad (4)$$

Où  $I_n^0(\epsilon)$  représente le coefficient de décomposition de la pupille réduite. Ce nouveau coefficient de décomposition  $I_n^0(\epsilon)$  peut s'exprimer en fonction du coefficient  $\gamma_n^0$ .

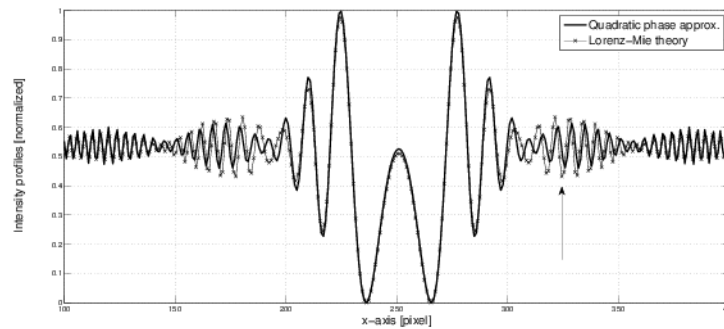
## II. HOLOGRAMES D'UNE GOUTTE D'EAU ET D'UNE BULLE D'AIR

Ce paragraphe permet de comparer les résultats du nouveau modèle avec ceux obtenus au moyen de la LMT. Les deux dispositifs optiques de référence sont illustrés figure (3)

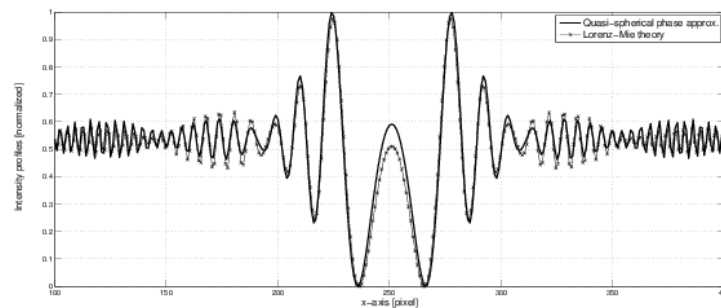


**Figure 3:** dispositif optique (a) d'une goutte d'eau dans l'air, (b) d'une bulle d'air dans l'eau

La figure 3a montre le dispositif expérimental de référence pour la simulation numérique. Il s'agit ici d'une goutte d'eau placée dans l'air. Quant à la figure 3b, elle montre la situation expérimentale de référence d'une bulle d'air placée dans l'eau. Pour des raisons de simulation vis-à-vis de la LMT, tout le dispositif est placé dans l'eau. La figure 4a montre une comparaison de l'hologramme d'une goutte d'eau dans l'approximation lentille mince avec la LMT et la figure 4b une comparaison entre l'approximation quasi-sphérique et la LMT.



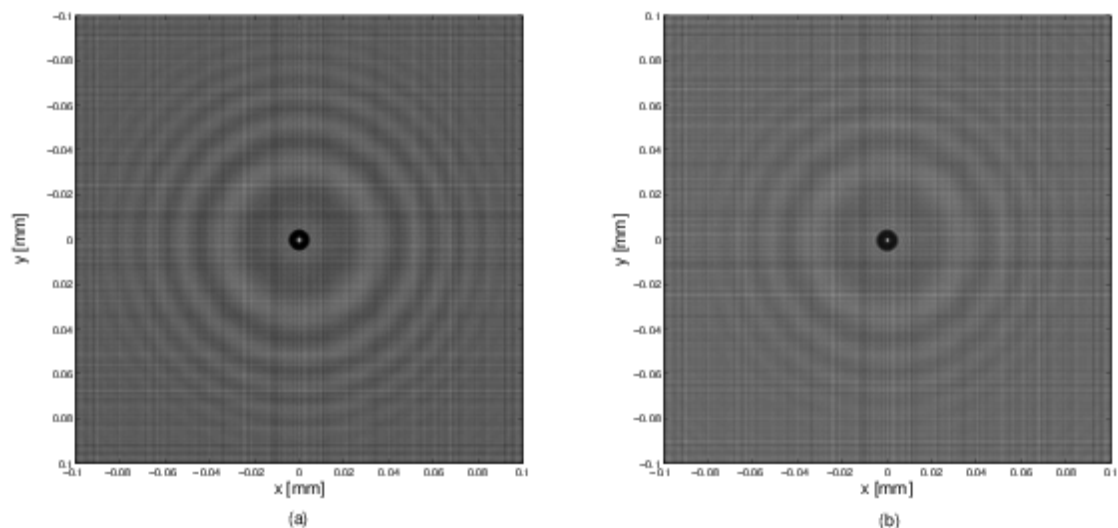
(a)



(b)

**Figure 4:** comparaison modèle scalaire et LMT, (a) approximation lentille mince (b) approximation quasi-sphérique.

Les profils sont très proches et donnent un haut coefficient de corrélation 2D supérieur à 0.9. Notons une réduction du coefficient de corrélation pour le modèle lentille mince pour des gros diamètres (de l'autre de 100 $\mu$ m). Les restitutions par transformation de Fourier fractionnaire montrent dans les deux cas précédents un spot lumineux au centre de l'image de la goutte. La figure 5 montre la restitution de la goutte dans le cas de l'approximation quasi-sphérique comparé à la LMT



**Figure 5:** Restitutions des hologrammes de goutte (a) cas de l'approximation quasi-sphérique, (b) cas de la LMT

Le spot central apparait donc comme un élément discriminant pour différencier une goutte d'une particule opaque pourvu que le dispositif expérimental ne filtre pas le spot. Nous pouvons maintenant aborder le cas d'une bulle d'air dans l'eau. La figure 6 montre une comparaison entre le modèle scalaire développé et le modèle rigoureux de Lorenz-Mie.

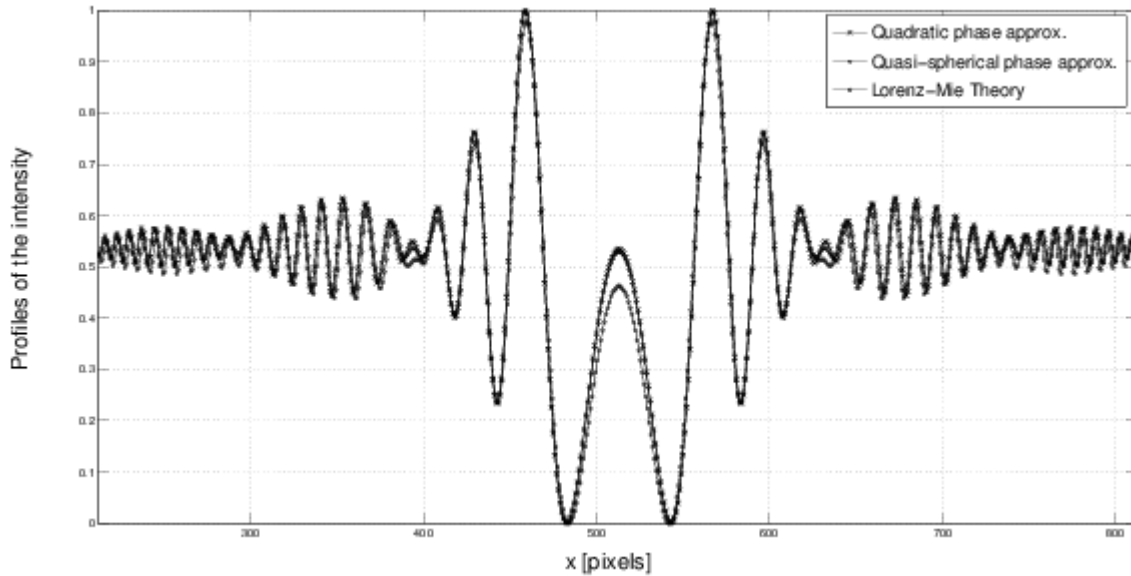


Figure 6: comparaison des hologrammes de bulles d'air entre le modèle scalaire et LMT

Cette comparaison montre une bonne adéquation des profils d'intensité et démontre la possibilité de considérer un anneau opaque à la périphérie de l'ouverture de la bulle avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.9. La figure 7 illustre une restitution par FRFT et met en évidence encore d'un spot lumineux au centre de la bulle.

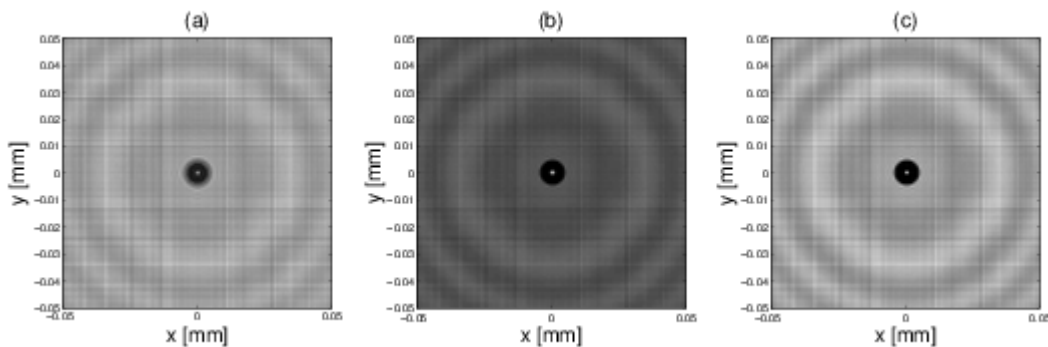


Figure 7: Restitution par FRFT (a) LMT, (b) approx. quadratique et (c) approx. Quasi-sphérique

### III. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Dans cette partie, les particules opaques ou les bulles d'air définissent des inclusions dans une goutte d'eau. Deux expériences ont donc été menées au laboratoire. La première est illustrée figure 8a

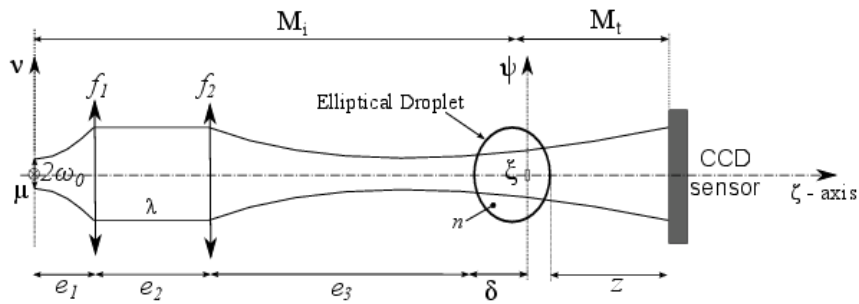


Figure 8a: Inclusion opaque

et concerne l'inclusion opaque. Dans cette expérience des particules de  $20\mu\text{m}\pm 5\mu\text{m}$  ont été injectée dans une goutte d'eau en suspension. Quant à la figure 8b, elle concerne l'inclusion type bulle d'air créée par échauffement laser induit sur des nano-germes (nanoparticules) de  $\text{TiO}_2$ .

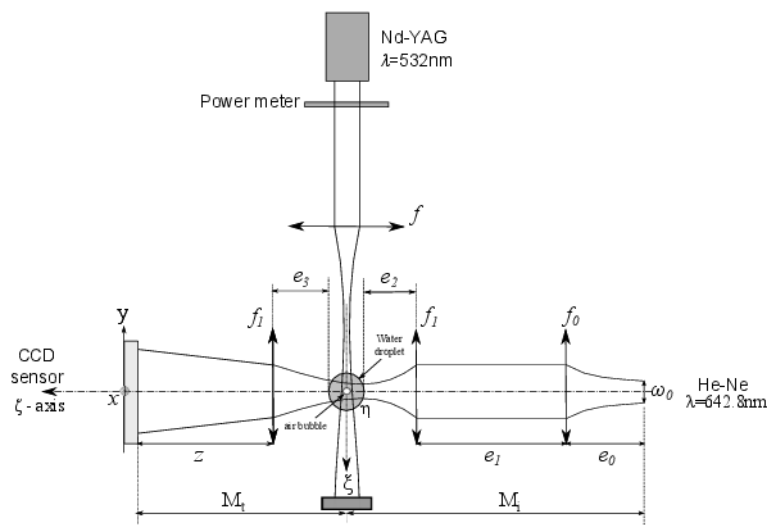


Figure 8a: Inclusion type bulle d'air

Les hologrammes obtenus permettent de conforter les modèles théoriques scalaires développés pour les 3 espèces d'objets. Par exemple, dans le cas une inclusion type particule opaque, l'hologramme expérimental illustré figure 9b confirme l'hologramme simulé figure 9a en traçant les profils d'intensité sur la figure 10.

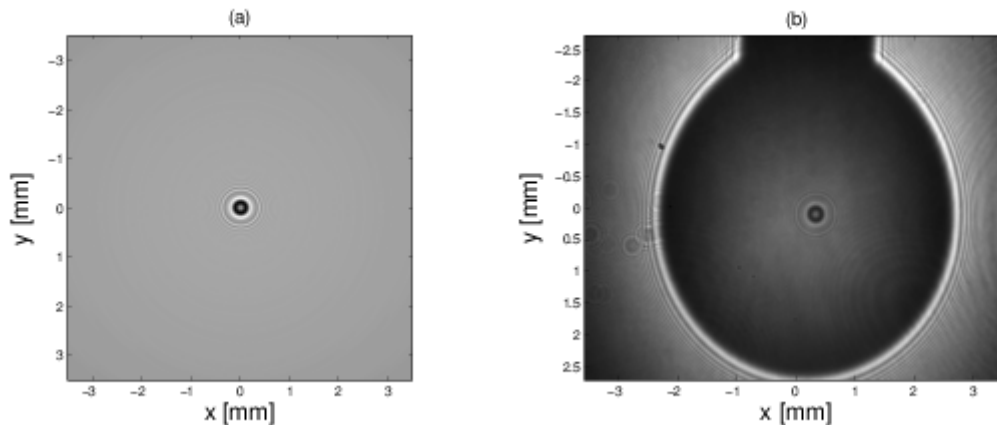


Figure 9: hologramme d'une inclusion opaque (a) simulé, (b) expérimental

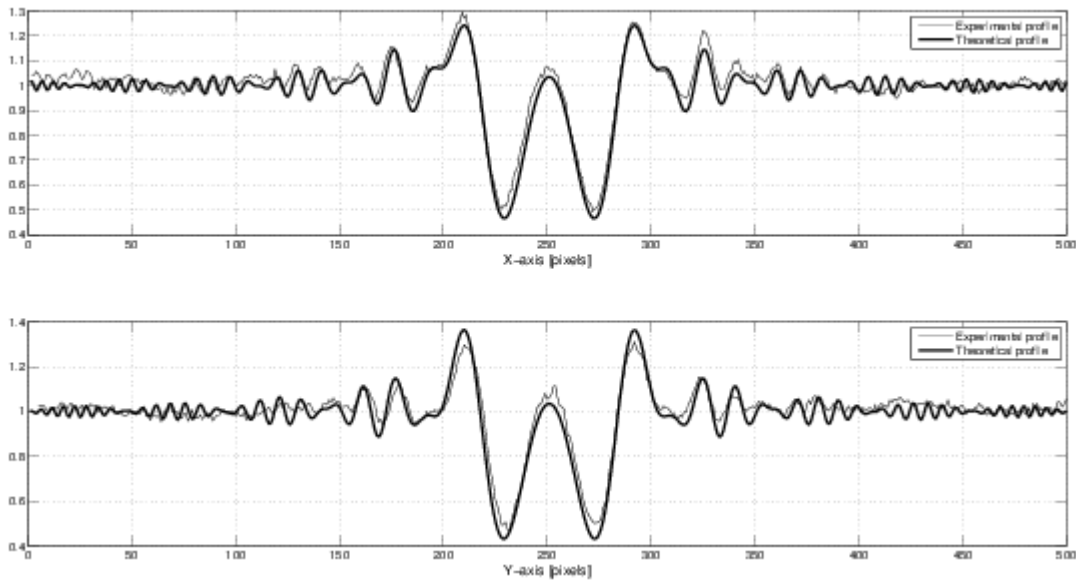


Figure 10: Profils d'intensité des hologrammes de la figure 9 suivant les deux axes de coordonnées.

La figure (10) montre que la goutte est astigmatique au sens de l'optique. Enfin l'hologramme expérimental dans le cas d'une inclusion type bulle d'air est représenté figure 11a et comparé à l'hologramme figure 11b en traçant les profils d'intensités figure 12. Ce dernier résultat montre la bonne estimation du modèle théorique scalaire avec un haut coefficient de corrélation 2D supérieur à 0.9.

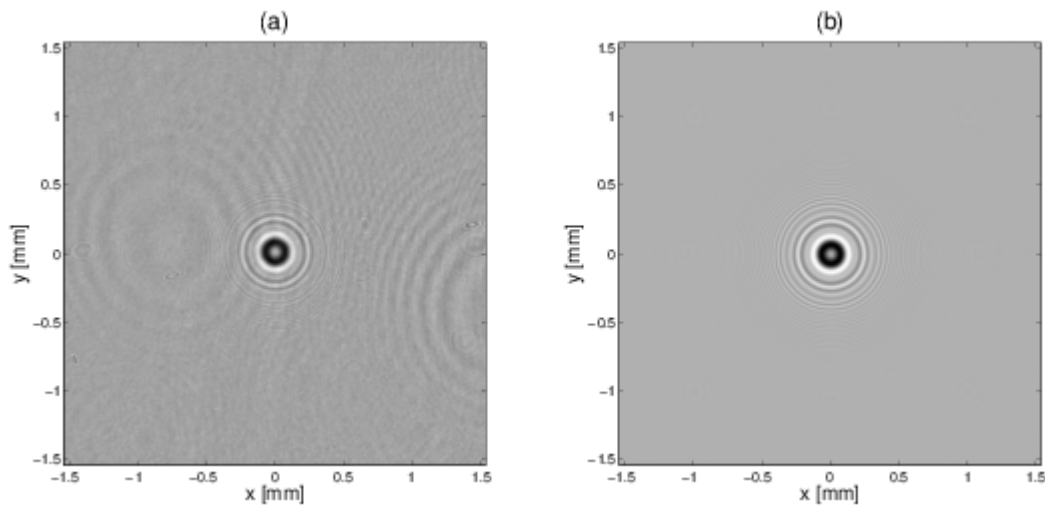
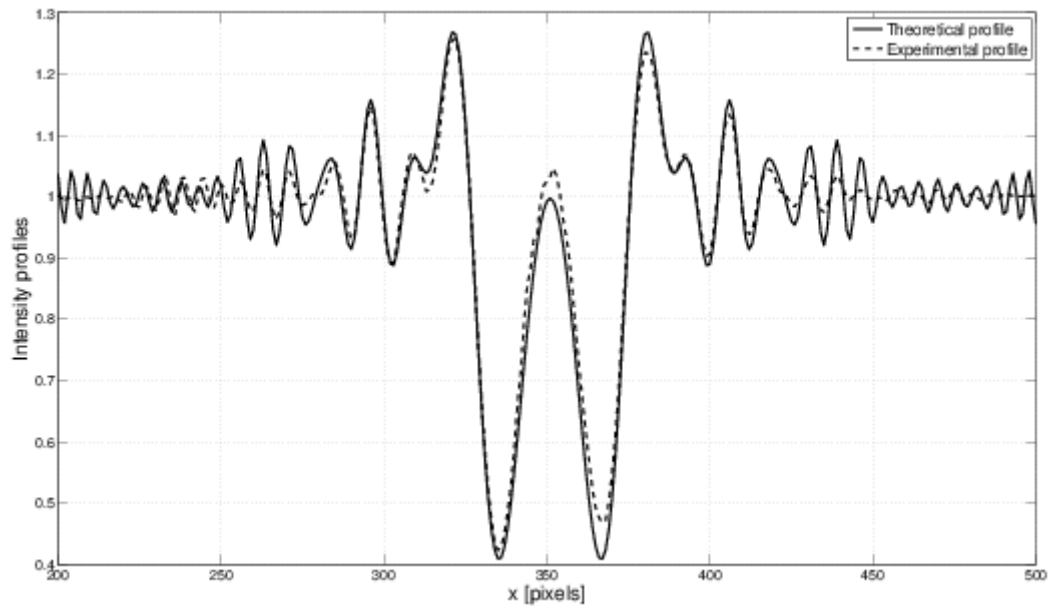


Figure 11: hologrammes d'une bulle d'air dans une goutte obtenus par (a) l'expérience, (b) la modélisation théorique



**Figure 12:** profils d'intensité de l'hologramme d'une bulle d'air dans une goutte.

La restitution n'est pas montrée ici mais elle est semblable aux restitutions montrées plus haut. La restitution montre encore une fois un spot lumineux au centre de l'image de la bulle.

## CONCLUSIONS

Nous avons donc maintenant un modèle théorique scalaire pour décrire des particules sphériques ou des bulles de gaz. Ce modèle comparé à l'expérience (numérique ou physique) permet lors de la restitution par FRFT de conserver la description du spot lumineux au centre de l'image de l'objet restitué et conserve l'ouverture du diamètre de l'objet. Il semble néanmoins définir les contextes expérimentaux qui permettent de préserver ce spot lumineux pour discriminer les particules opaques des particules transparentes et respectivement les bulles de gaz.

## REMERCIEMENTS

Cette étude est cofinancée par le projet «Développement de Techniques optiques 3D pour écoulements complexes» du LABEX EMC3 (Energy, Materials and Clean Combustion Center), et l'ANR, noté ANR-2011-NANO-008, et intitulé NANOMORPH.

## REFERENCE

[1] COETMELLE, S. et al. Digital in-line holography assessment for general phase and opaque particle. Journal of the European Optical Society - Rapid publications, Europe, v. 9, jun. 2014.