

HOLOGRAMMES NUMÉRIQUES DE GOUTTES EN ÉVAPORATION

L. Méès, N. Grosjean, Jean-Louis Marié, M. Seifi, Clarisse Fournier

▶ To cite this version:

L. Méès, N. Grosjean, Jean-Louis Marié, M. Seifi, Clarisse Fournier. HOLOGRAMMES NUMÉRIQUES DE GOUTTES EN ÉVAPORATION. 2ème rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2012, Bruxelles, Belgique. hal-02403069

HAL Id: hal-02403069 https://hal.science/hal-02403069

Submitted on 10 Dec 2019

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.

HOLOGRAMMES NUMÉRIQUES DE GOUTTES EN ÉVAPORATION

L. Méès¹, N.Grosjean¹, J.L.Marié¹, M.Seifi², C.Fournier², M. Lance¹

 ¹⁾ Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique (LMFA), 36 av Guy de Collongue, Ecole Centrale de Lyon, 69134 ECULLY
²⁾ Laboratoire Hubert Curien UMR5516, CNRS – Université Jean-Monnet, Télécom Saint Etienne, St Etienne, France.

loic.mees@ec-lyon.fr, corinne.fournier@telecom-st-etienne.fr,

MOTS CLES

Mesures Lagrangiennes, Holographie Numérique, Sillages Évaporants, Théorie de Lorenz-Mie, problèmes inverses.

RESUME

Nous utilisons l'Holographie Numérique pour étudier le couplage entre l'évaporation et la dispersion turbulente de gouttes d'un point de vue Lagrangien. Nos expériences menées sur des gouttes de fréon en évaporation ont mis en évidence la présence de sillages évaporant [1] qui modifient les hologrammes. Ces sillages apportent des informations sur la vitesse relative lagrangienne du gaz autour de la goutte. Ils contiennent d'autres informations que nous souhaitons pouvoir exploiter. Nous attribuons ces sillages à un effet de gradient d'indice de réfraction (température et/ou composition) dans le gaz environnant. Nous présentons ici des hologrammes de gouttes évaporantes, simulés au moyen de la Théorie de Lorenz-Mie Généralisées pour une sphère à couches concentriques. Nous montrons à l'aide de quelques exemples que la présence d'un gradient d'indice à l'extérieur d'une goutte modifie son hologramme d'une manière similaire à celle observée sur des gouttes d'éther en évaporation dans un air au repos. Ces premiers résultats justifient l'utilisation d'un masque dans le traitement des hologrammes déformés [1], seul moyen existant à ce jour pour traiter ces hologrammes. Ils ouvrent également la voie à la prise en compte des propriétés optiques de l'environnement gazeux des gouttes dans le traitement des hologrammes par une approche « problèmes inverses », et à une mesure de ces propriétés.

I. INTRODUCTION

L'évaporation de gouttes transportées dans un écoulement turbulent est un phénomène physique que l'on rencontre dans de nombreuses situations. La complexité de ce type d'écoulement réside dans le couplage qui existe entre le processus d'évaporation et la dispersion turbulente. En interagissant avec les structures turbulentes, les gouttes suivent des trajectoires différentes et sont soumises à des fluctuations de vitesses relatives différentes au cours de leur mouvement. Ces fluctuations affectent les transferts locaux de chaleur, si bien que chaque goutte s'évapore différemment selon la trajectoire suivie. De plus, selon leur nombre de Stokes, les gouttes peuvent s'accumuler de facon préférentielle dans certaines régions et former des clusters, ce qui influence également l'évaporation. Ces deux processus produisent de la polydispersion en taille. Dans le même temps, l'évaporation modifie les forces instantanées agissant sur la goutte, modifiant ainsi sa trajectoire dans un couplage inverse complexe. Pour comprendre les mécanismes physiques pilotant ces phénomènes, il est nécessaire d'utiliser des techniques qui permettent de mesurer le déplacement des gouttes dans l'espace et l'évolution de leur diamètre le long de leur trajectoire. De telles mesures Lagrangiennes ont récemment été menées sur des particules non-évaporantes dans des écoulements turbulents au moyen de techniques telles que le suivi acoustique [2], l'imagerie rapide [3], ou encore l'holographie numérique [4,5]. Parmi ces techniques, nous avons montré que l'holographie numérique était particulièrement bien adaptée au suivi Lagrangien de gouttes évaporantes [1] et que le traitement des hologrammes par des algorithmes basés sur une approche « problèmes inverses » [6] apportait aux mesures de positions et de diamètres la précision requise pour de telles études. Pour atteindre cette précision, ces algorithmes se basent la connaissance du modèle direct de formation de l'hologramme.

Dans les expériences menées sur des gouttelettes de Fréon en évaporation, nous avons mis en évidence l'existence d'une image de sillage sur les hologrammes. (Fig.1). Cette image de sillage permet de visualiser le mouvement relatif Lagrangien du fluide autour de la goutte. Cependant, n'étant pas considéré dans le modèle de formation d'image, ce sillage (agissant comme du bruit) réduit la précision de la reconstruction 3D [7].



Figure 1: Hologramme de gouttes de Fréon (~300 μ m) avec leurs sillages. Flèche noire : vitesse de la goutte estimée par holographie numérique; Flèche bleue : direction de la vitesse relative donnée par la direction du sillage.

Dans une seconde expérience, menée sur des gouttes d'éther en évaporation (Fig. 2), les sillages sont moins apparents du fait des plus faibles vitesses relatives. La tache lumineuse au centre des hologrammes est en revanche bien présente. Sur le profil d'intensité représenté à droite de la figure 2, l'intensité de la frange centrale est anormalement élevée. Elle devrait être égale à la moyenne du signal (zéro avec la normalisation adoptée), comme indiqué par un trait rouge sur la figure.

Une première approche, déjà adoptée dans un précédent travail [1], consiste à consiste à ne pas considérer (à l'aide d'un masque apposé sur l'image) les pixels affectés par le sillage Pour aller plus loin, il est nécessaire de comprendre et de modéliser la perturbation observée dans le modèle de formation des images. C'est cette étape que nous nous proposons de franchir ici en montrant que l'anomalie constatée sur les hologrammes peut s'expliquer par la présence d'un gradient d'indice de réfraction (température et/ou composition chimique) autour des gouttes et qu'elle peut être reproduite par le calcul, au moyen de la Théorie de Lorenz-Mie Généralisée pour une sphère à couches concentriques.



Figure 2 : Hologrammes de gouttes d'éther en évaporation de 60 μ m environ (à gauche) et profil anormal de diffraction (à droite). Le trait rouge représente le niveau habituel et attendu de la frange centrale.

II. THEORIE DE LORENZ-MIE GENERALISEE.

La Théorie de Lorenz-Mie (TLM) [8-10], fournit une solution exacte et semi-analytique au problème de la diffusion d'une onde électromagnétique plane par un objet sphérique, sans limitation de taille ou d'indice de réfraction. Cette méthode de résolution a été étendue à de nombreuses configurations, moins restrictives. La Théorie de Lorenz-Mie Généralisée (TLMG) permet notamment de lever l'hypothèse d'un éclairage uniforme en considérant par exemple un faisceau laser focalisé [11]. La TLM et la TLMG ont également été étendues au cas d'objets de formes régulières mais non sphériques [12] : cylindre, sphéroïde ou sphère à couches concentriques [13,14], à la laquelle nous



allons nous intéresser ici. En effet il est possible de modéliser un gradient concentrique de température ou de composition chimique, dans ou autour d'une goutte sphérique, en considérant un grand nombre de couches très minces, caractérisées chacune par un indice de réfraction différent. Il est ainsi possible de modéliser une goutte présentant un gradient concentrique d'indice pour les besoin d'une application [15]. Il est également possible de modéliser un gradient d'indice concentrique à l'extérieur d'une goutte au moyen du même modèle.

Nous n'entrerons pas ici dans le détail des calculs. La TLMG permet de calculer les champs électromagnétiques diffusés par une sphère homogène ou à couches concentriques, éclairée par un faisceau focalisé. Les hologrammes sont obtenus en sommant ces champs aux champs du faisceau de référence (faisceau incident ici) et en calculant l'intensité résultante. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à l'impact de la divergence du faisceau d'éclairage sur les hologrammes. L'hologramme de la Fig. 2 a été enregistré grâce à un montage en ligne (holographie de Gabor) avec un faisceau divergeant. Le montage est représenté Fig. 3. Un faisceau laser (λ =532 nm) est focalisé en un point S à l'aide d'une lentille de focale 12 mm, de manière à obtenir un éclairage divergent de l'objet (goutte ou mire). L'hologramme est enregistré par un capteur CMOS placé à la distance z_s du noint de focalisation S et à la distance z_s de l'objet.

point de focalisation S et à la distance z_E de l'objet.



Figure 3 : Schéma du montage expérimental.

Dans ces conditions d'éclairage divergeant les figures holographiques sont soumises à un facteur de grandissement géométrique [16] qui affecte à la fois la taille de l'objet mesuré et la distance de reconstruction. Il s'écrit :

$$G = \frac{z_s}{z_s - z_E} \tag{1}$$

Ce facteur de grandissement dépend ainsi de la position z_E de l'objet, Il a été mesuré pour différentes positions z_E d'une mire de calibration. Pour $z_E = 360$ mm, on obtient G = 2.895 et on en déduit une valeur précise de $z_S = 553.65$ mm, plus difficile à mesurer. La figure 4 montre les valeurs mesurées de G en fonction de la position z_E de la mire ainsi que les valeurs calculées de G à partir de l'eq. (1) et de la valeur de $z_S = 553.65$ mm.



Figure 4 : facteur de grandissement géométrique mesuré en fonction de la distance z_E entre le l'objet et le capteur.

La figure 5 montre l'hologramme synthétique calculé par TLMG d'une goutte homogène de diamètre $d_G=30 \ \mu m$ et d'indice $n_G=1.34$, placé à la distance $z_E = 360 \ mm$ du capteur. Cette goutte est éclairée par un faisceau focalisé de rayon au col $\omega = 2 \ \mu m$, de longueur d'onde $\lambda=532 \ nm$ et placé à la distance $z_S = 553.65 \ mm$ du capteur. Cet hologramme est comparé à l'hologramme d'une goutte de diamètre $G.d_G = 85.77 \ \mu m$, éclairée par une onde plane, de même indice de réfraction n_G et placé à une distance $G. z_E = 1029.24 \ mm$. Les deux hologrammes sont quasiment identiques, montrant que l'effet de la divergence du faisceau est bien pris en compte par le facteur géométrique G, ce qui autorise une reconstruction ou une inversion des hologrammes à l'aide d'un modèle en onde plane.



Figure 5 : hologrammes calculés par TLMG pour (en noire) une goutte de $G.d_G = 85.77 \ \mu m$, distante de $G.z_E = 1029.24 \ mm$ du capteur et éclairée par une onde plane et (en rouge) une goutte de $d_G = 30 \ \mu m$ distante de $z_E = 360 \ mm$ du capteur et éclairée par un faisceau focalisé dont le col est situé à $z_S = 553.65 \ mm$ du capteur.

III. Hologrammes synthétiques d'une goutte en évaporation.

Une goutte en évaporation peut être modélisée par une sphère centrale de rayon r_G (rayon de la goutte) et d'indice n_G (indice de la goutte) entourée d'une multitude de couches sphériques de rayons r_i et d'indice n_i (i variant de 1 à n), décrivant une évolution d'indice quasi-continue autour de la goutte. Nous ne considérerons pas ici de gradient d'indice à l'intérieur de la goutte, car nos calculs montrent qu'un tel gradient ne modifie pas de manière significative les figures de diffraction qui nous intéressent.

La figure 6 montre les hologrammes synthétiques de gouttes d'éther ($n_G = 1.34$) entourées de couches concentriques décrivant différents gradients d'indice dans le gaz. Ces gradients d'indice peuvent être liés à des gradients de température, de composition chimique ou les deux à la fois. Nous considérons ici un cas simple où le profil d'indice le long du rayon r est gaussien, avec un maximum de $1+\Delta n$ (avec $\Delta n=10^4$) à la surface de la goutte et un indice de 1 loin de la goutte. Dans la goutte, pour r compris entre 0 et $r_G=15 \ \mu m$, l'indice vaut $n_G=1.34$. Les gradients à l'extérieur de la goutte sont décrits par 100 couches. Les hologrammes sont comparés à l'hologramme d'une goutte homogène (sans gradient d'indice dans le gaz) en appliquant la normalisation qui s'impose. On constate que la présence d'un gradient à l'extérieur de la goutte se traduit par une modification de l'hologramme, principalement en son centre où la première frange voit son intensité croitre avec l'épaisseur δr du gradient, de manière analogue à nos observations (Fig.2). On constate également qu'au-delà de la deuxième frange, les hologrammes ne sont quasiment pas affectés par le gradient. On en déduit que dans la configuration étudiée et pour des gradients d'indice similaires à ceux considérés figure 6, il est possible de traiter les hologrammes de manière classique à l'aide d'un masque, comme dans la réf. [1].

Figure 7, nous avons fait varier l'amplitude Δn du gradient au lieu de son épaisseur δr qui reste constante et égale à 30 µm. L'intensité de la frange centrale croit ainsi avec l'amplitude du gradient d'indice de tel sorte que l'on retrouve une figure holographique présentant la même « anomalie » que dans nos observations. On constate toutefois que la deuxième frange et les franges suivantes sont davantage affectées par l'augmentation d'amplitude Δn du gradient que par son extension δr . Les deux

paramètres n'affectent donc pas de manière équivalente les hologrammes et ils peuvent être ajustés pour produire un hologramme similaire à celui observé expérimentalement fig.2, comme le montre la partie droite de la figure 7.



Figure 6 : Hologrammes synthétiques (calcul par GLMT au centre et en bas) de gouttes d'éther de 30 μ m entourées de gradients d'indice concentriques et gaussiens (profils d'indice en haut).



Figure 7 : Hologrammes synthétiques de gouttes d'éther de 30 μ m (à gauche) entourées de gradients d'indice concentriques gaussiens d'amplitude Δn croissantes. A droite : hologramme similaire à l'hologramme expérimental de la Fig. 2 (d_G=60 μ m, Δn =5 10⁻⁵ et δr =150 μ m).

IV. CONCLUSIONS

Nous avons présenté des hologrammes synthétiques de gouttes en évaporation. Les calculs ont été réalisés dans le cadre de la théorie de Lorenz-Mie Généralisée pour une sphère à couches

concentriques ce qui permet de prendre en compte la divergence du faisceau d'éclairage et de décrire un gradient d'indice de réfraction autour de la goutte. Les quelques exemples de calcul présentés ici montrent que les « anomalies » constatées sur les hologrammes de gouttes en évaporation dans deux expériences différentes, trouvent une explication dans la présence d'un gradient d'indice dans leur environnement proche. Les déformations induites par ces gradients semblent se concentrer sur les premières franges et permettent donc un traitement classique des hologrammes à condition d'en masquer la partie centrale. Sur les exemples présentés, il apparait très clairement que les hologrammes sont identiques à ceux d'une goutte non-évaporante de même diamètre et de même position, au-delà de la deuxième ou de la troisième frange. Ce travail est un premier pas vers la prise en compte de cet effet de gradient d'indice dans le traitement des hologrammes et une mesure des propriétés optiques de l'environnement proche des gouttes.

REFERENCES

[1] Chareyron D., Marié J.L., Fournier C., Gire G., Grosjean N., Denis L., Lance M. and Méès L. Testing an in-line digital holography "inverse" method for the Lagrangian tracking of evaporating droplets in homogeneous nearly isotropic turbulence . *New J. of Physics*, 14, <u>doi:10.1088/1367-2630/14/4/043039</u>, 2012.

[2] Mordant N., Lévêque E., Pinton J.-F. (2004). Experimental and numerical study of the Lagrangian dynamics of high Reynolds turbulence, *New J. of Phys.*, **6**, 116.

[3] Bourgoin M., Ouellette N.T., Xu H., Berg J., Bodenschatz E. (2006). The role of pair dispersion in turbulent flow. *Science*, **311**, 835–838.

[4] Gopalan B., Malkiel E., Katz J. (2008). Experimental investigation of turbulent diffusion of slightly buoyant droplets in locally isotropic turbulence. *Phys. Fluids*, **20**, 095102.

[5] Lu J., Fugal J.P., Nordsiek H., Saw E.W., Shaw R.A., Yang W. (2008). Lagrangian particle tracking in three dimensions via single camera in-line digital holography, *New J. of Phys.*, **10**,125013.

[6] Soulez F., Denis L., Fournier C., Thiébaut E. & Goepfert C. (2007). Inverse problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization. *J. Opt. Soc. Am.*, **24**, 1164–1171.

[7] C. Fournier, L. Denis, et T. Fournel (2010), On the single point resolution of on-axis digital holography, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 27, n^o. 8, p. 1856-1862.

[8] L. Lorenz. Lysbevaegelsen i og uden for en af plane Lysbølger belyst Kulge. Vidensk. Selk. Skr., 6 :1–62, 1890.

[9] G. Mie. Beiträge zur Optik Trüber Medien speziell kolloidaler Metallösungen. Ann. der Phys., 25 :377–452, 1908.

[10] P. Debye. Der Lichtdruck auf Kugeln von beliebigem Material (1909). Ann. der Phys., 4(30) :57–136.

[11] G. Gouesbet, B. Maheu, and G. Gréhan (1988). Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation. J. Opt. Soc. Amer. A., 5(9) :1427–1443.

[12]G. Gouesbet, G. Gréhan, (2000). Generalized Lorenz-Mie Theories, from past to future. Atomization and Sprays 10 (3–5) 277-333.

[13] F. Onofri, G. Gréhan, G. Gouesbet (1995), Electromagnetic scattering from a multi-layered sphere located in an arbitrary beam. Applied Optics **34** (30) 7113-7124.

[14] Z.S. Wu, L. X Guo, K.F. Ren, G. Gouesbet, G. Gréhan (1997). Improved algorithm for electromagnetic scattering of plane waves and shaped beams by multilayered spheres. Applied Optics **36** (21) 5188-5198.

[15] S. Saengkaew, T.Charinpanitkul, H. Vanisri, W. Tanthalpanichakon, Yves Biscos, Nicolas Garcia, Gérard Lavergne, L. Méès, G. Gouesbet and G. Gréhan (2007). Rainbow refractrometry on particles with radial refractive index gradients. Experiments in fluids, Vol. 43 (4), p. 595-601.

[16] Amsler P, Stetzer O, Schnaiter M, Hesse E, Benz S, Moehler O and Lohmann (2009) Ice crystal habits from cloud chamber studies obtained by in-line holographic microscopy related to depolarization measurements. Appl. Opt. 48 5811–22.