



**HAL**  
open science

## Estimation par diffractométrie arc-en-ciel de la taille et la température de gouttes s'écartant de la sphéricité

Fabrice R. A. Onofri, Quentin Gaubert, Kuan Fang Ren

### ► To cite this version:

Fabrice R. A. Onofri, Quentin Gaubert, Kuan Fang Ren. Estimation par diffractométrie arc-en-ciel de la taille et la température de gouttes s'écartant de la sphéricité. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097666

**HAL Id: hal-02097666**

**<https://hal.science/hal-02097666>**

Submitted on 12 Apr 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.

# Estimation par diffractométrie arc-en-ciel de la taille et la température de gouttes dont la forme s'écarte de la sphéricité « parfaite »

Fabrice R.A. ONOFRI<sup>1</sup>, Quentin GAUBERT<sup>1</sup>, Kuan Fang REN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI, UMR 7343, 13453, Marseille, France

<sup>2</sup> Université de Rouen Normandie, INSA de ROUEN, CNRS, UMR 6614, 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray, France

Email auteur correspondant : Fabrice.Onofri@univ-amu.fr; kang.ren@coria.fr

L'influence de la non-sphéricité des gouttes sur leurs diagrammes de diffusion est étudiée avec une approximation d'optique géométrique avancée et des expériences réalisées sous lévitation acoustique. Il ressort de ces travaux qu'un changement quasi imperceptible de la morphologie des gouttes peut affecter significativement leurs propriétés de diffusion et ainsi notre capacité à estimer avec précision leur taille et leur température.

## 1 Introduction

Nombre de diagnostics optiques présupposent une sphéricité parfaite des particules devant être caractériser alors que, dans les écoulements réels, ces objets, souvent fluides (gouttelettes, bulles, . . .), peuvent être fortement déformés du fait de la gravité, la trainée et des interactions de sillage, des collisions, etc. Ajoutons que du simple fait du champ gravitaire une goutte ou bulle ne peut tout simplement pas être totalement sphérique. Ceci étant rappelé, d'un point de vue pratique l'important est bien souvent de déterminer si cette déviation au modèle canonique (sphère parfaite) est significative ou pas pour un problème donné. Pour évaluer l'importance de cette déviation, il faut donc disposer d'un modèle permettant d'en évaluer les effets potentiels. Dans le domaine de la granulométrie optique, ce dernier est un modèle de diffusion de la lumière. Dans cet article, nous nous limitons à l'étude de la réponse d'un diffractomètre à l'angle d'arc-en-ciel lors de la caractérisation de gouttes ellipsoïdales. Le calcul des propriétés de diffusion de la lumière de gouttes non sphériques dont le diamètre équivalent sphérique dépasse quelques dizaines de micromètres dépasse largement les capacités des codes électromagnétiques actuels [1]. C'est la raison pour laquelle nous développons des d'approximations d'optique géométrique et physique (acronymes anglais respectifs : GOA et POA) [2, 3]. Avec les particules de formes complexes, la seconde difficulté majeure est l'augmentation du nombre d'inconnues à déterminer et/ou contrôler. Ainsi, en passant de la sphère à un ellipsoïde quelconque, on passe de 1 paramètre morphologique (1 rayon) à 6 inconnues (3 rayons principaux et 3 angles d'Euler). Pour éliminer certaines de ces inconnues, nous levitons la goutte à caractériser à l'aide d'un champ acoustique [4].

## 2 Modèle de diffusion et expériences

Le modèle de diffusion utilisé dans cette étude est une GOA qualifiée de « Vectorial Complex Ray Model (VCRM) » [2, 4, 5]. VCRM permet d'associer à chaque rayon une direction, une amplitude, une phase, une polarisation et une matrice 2x2 décrivant la courbure locale du front d'onde. L'interaction de ce rayon avec la particule est décrite à l'aide d'un formalisme algébrique qui relie la courbure du front d'onde transmis ou réfléchi localement par la particule à celle du front d'onde de la lumière incidente. Cette dernière peut-être une onde plane ou un faisceau gaussien [5]. La surface de la particule doit être lisse, c.-à-d. qu'elle doit pouvoir être décrite par une fonction analytique continue et dérivable (à minima de classe C2). En raison des l'hypothèses intrinsèques à l'optique géométrique, les prédictions de VCRM ne sont asymptotiquement valables que pour des diffuseurs de grands paramètres de taille ( $\alpha \gg 20-100$ ) et loin des zones angulaires où les phénomènes ondulatoires (ondes de surfaces, diffraction, caustiques, . . .) prédominent. La mise en œuvre numérique de VCRM est encore limitée aux ellipsoïdes (demi-axes: a, b & c, voir la figure 1b) observés dans un plan de symétrie. Cependant, contrairement aux approches géométriques classiques comme le modèle de Moebius ou les méthodes de tracé de rayon [5], elle permet cependant de prédire à la fois les structures basses et hautes fréquences des diagrammes de diffusion.

Les expériences ont été réalisées sur des gouttes d'eau en lévitation dans un piège acoustique. La nouveauté, par rapport à notre communication précédente [6], tient au fait que le piège acoustique est désormais placé dans une chambre d'évaporation, voir la figure 1(a). Cette configuration permet de réguler la température ( $T$ ) et le taux d'humidité ( $H$ ) de l'air entourant la gouttelette. On peut ainsi jouer sur la vitesse d'évaporation de cette dernière. Cette chambre permet également de générer un jet laminaire qui impacte la goutte de façon à forcer la convection et advecter les tourbillons acoustiques. En ajustant le niveau de pression sonore dans le piège, on peut contrôler l'aplatissement de la gouttelette (qui est essentiellement oblate).

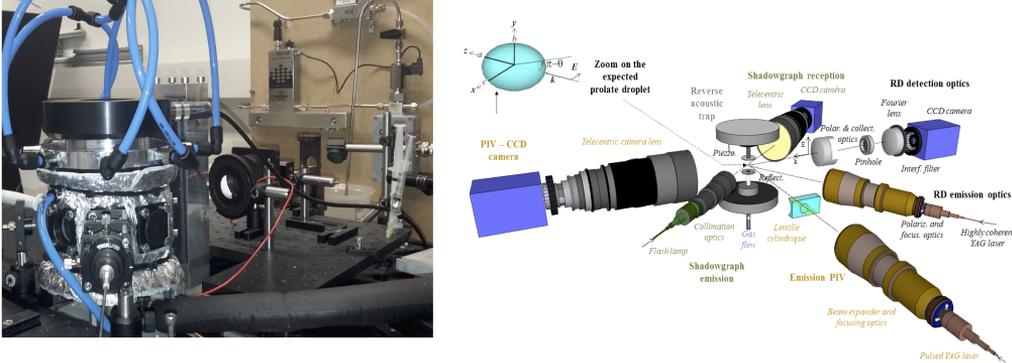


Figure 1: (a) Photographie de la chambre d'évaporation contenant le piège acoustique et (b) principaux diagnostics optiques mis en place: imagerie ombroscopique, diffractométrie arc-en-ciel et PIV.

### 3 Résultats et discussion

Nous évaluons tout d'abord l'influence du rapport d'aspect ( $\xi = b/a$ ) des gouttes sur l'estimation de leur diamètre équivalent sphérique si on suppose qu'elles sont sphériques, voir la figure 2(a). On rappelle que l'on a  $\xi = 1$  pour la sphère,  $\xi > 1$  pour un sphéroïde oblate (aplatis) et  $\xi < 1$  pour un sphéroïde prolate (allongé). Pour ce calcul, VCRM a donc été utilisé pour générer les signaux arc-en-ciel que produiraient des gouttes ellipsoïdales orientées suivant les axes du système optique avec  $\xi = 0, 9 - 1, 1$ , voir la figure 1. Ces signaux ont ensuite été inversés [4] en utilisant la théorie de Lorenz-Mie (LMT) comme modèle de diffusion - comme le ferait un diffractomètre arc-en-ciel classique. Ce faisant, la figure 2(a) montre que l'erreur augmente quasi linéairement avec le rapport d'aspect. La figure 2(b) présente l'évolution avec  $\xi$  de la fréquence de la structure d'ondulation (appelée aussi structure fine ou haute fréquence) du signal arc-en-ciel. Force est de constater que la fréquence de la structure d'ondulation, qui est quasi systématiquement ignorée dans la littérature, augmente fortement avec  $\xi$ . La figure 2(c) montre l'évolution correspondante de l'angle d'arc-en-ciel géométrique (position de la caustique géométrique) et de la position angulaire du premier minima des signaux arc-en-ciel (c.-à-d. la première frange sombre) pour différentes inclinaisons (angle  $\gamma$ ) du sphéroïde dans son plan de symétrie. On constate qu'une inclinaison de la goutte, même très faible, modifie considérablement la position de l'arc-en-ciel. De fait, toutes nos simulations montrent que la difficulté principale avec les gouttes sphéroïdales, outre l'apparition de nouvelles caustiques (comme l'hyperbolique ombilique) [4, 7, 8, 9], est une sensibilité extrême des diagrammes de diffusion à l'inclinaison des gouttes. A tel point que, dans l'état, il nous semble impossible de remonter aux paramètres classiquement recherchés (granulométrie et composition) si les gouttes n'ont pas des orientations très particulières ou parfaitement connues. En guise d'illustration des résultats expérimentaux obtenus lors de cette étude, la figure 3 compare les moyennes et écarts-types des différences entre paramètres de référence et paramètres estimés. Les valeurs de référence sont obtenues avec le système d'imagerie (rayons principaux mesurés :  $a$  &  $c$ ) et des thermocouples placés dans la chambre. Ces résultats correspondent à une goutte d'eau qui s'évapore en 5' à pression atmosphérique avec  $T=29^\circ\text{C}$  et  $H = 60\%$ . Compte tenu de la durée de l'expérience, l'hypothèse d'un régime d'évaporation quasi-stationnaire, et donc d'une goutte isotherme, semble raisonnable. Les thermocouples nous permettent donc d'estimer la température de la goutte. Au cours de l'expérience, le rayon équivalent sphérique

de la goutte diminue typiquement de 380 à 50  $\mu\text{m}$ . Avec un taux d'acquisition de 1 Hz, les statistiques sont donc réalisées sur 330 tailles et indices. Les paramètres estimés avec le diffractomètre sont : les rayons horizontaux ( $a$  et  $c$ ), le rayon vertical ( $b$ ), l'indice de réfraction de la goutte ( $m$  dont on déduit sa température) et son rayon équivalent sphérique  $R = (abc)^{1/3}$ . Le résidu de la méthode inverse est également tracé dans la figure 3. Les six cas testés ( $n^\circ$  1, 2, ..., 6) correspondent à différentes hypothèses sur la morphologie de la gouttelette: (1) ellipsoïde arbitraire, (2-5) sphéroïdes avec des orientations particulières (voir le Tableau 1 pour plus de détails) et (6) sphère. Les barres d'erreur de la figure 3 correspondent à l'écart-type sur l'estimation de chaque paramètre.

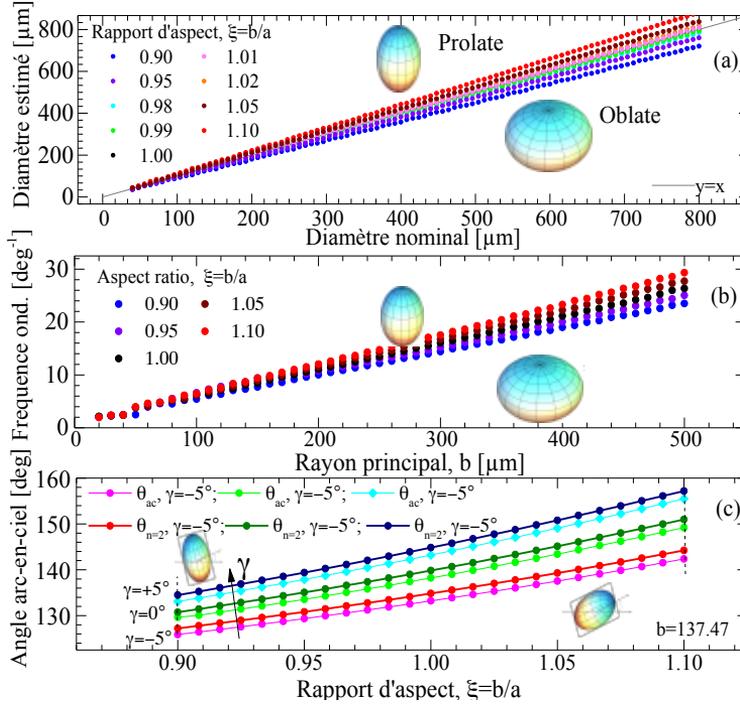


Figure 2: Simulations pour des gouttes d'eau sphéroïdales à  $T = 24^\circ\text{C}$  ( $m = 1,3350$ ). (a) Estimation de l'erreur sur la détermination du diamètre équivalent sphérique lorsque la LMT (c.-à-d. une hypothèse de particule sphérique) est utilisée pour inverser les signaux arc-en-ciel générés par VCRM pour différents rapports d'aspect. (b) Evolution avec le rapport d'aspect de la fréquence angulaire de la structure d'ondulation de l'arc-en-ciel. (c) Décalage angulaire de l'angle d'arc-en-ciel géométrique et de la première frange sombre avec le rapport d'aspect et l'angle d'inclinaison des gouttes dans le plan de symétrie (gouttes de volume constant avec  $b$  fixé).

Forme $n^\circ$	Paramètres morphologiques: rayons principaux $a$ , $b$ , $c$
1	$a \neq b \neq c$ : ellipsoïde quelconque
2	$a = c \neq b$ : sphéroïde d'axe de symétrie parallèle à la gravité
3	$a = b \neq c$ : sphéroïde d'axe de symétrie perpendiculaire à la gravité et l'axe optique
4	$b = c \neq a$ : sphéroïde d'axe de symétrie parallèle à l'axe optique
5	$a = c \neq b$ avec $b/a$ déduit par imagerie: sphéroïde d'axe de symétrie parallèle à la gravité
6	$a = b = c$ : sphère

Table 1: Formes utilisées pour inverser les diagrammes expérimentaux de gouttes d'eau s'évaporant dans une atmosphère contrôlée.

Les résultats de la figure 3 montrent tout d'abord un bon, voire un très bon accord sur les valeurs moyennes. La forme ellipsoïde (cas n°1) est celle qui minimise l'écart sur les moyennes et les écarts-types. Ce résultat était en partie prévisible car le modèle ellipsoïdal est celui qui dispose du plus de degrés de liberté. De fait, ce modèle est mieux à même de rendre compte des fluctuations de la forme de la gouttelette. Ceci prouve également la robustesse de notre méthode inverse. Logiquement, c'est le cas sphérique (n°6) qui induit le plus d'erreur sur la valeur moyenne. On peut aussi conclure que la goutte n'est définitivement pas sphérique et que la structure d'ondulation du diagramme de diffusion joue un rôle important dans la reconstruction. Plus surprenant, on pouvait s'attendre à ce que le sphéroïde d'axe vertical (n°2) donne les meilleurs résultats après le cas n°1, mais ce sont en fait les formes n°3 et 4 (sphéroïdes orientés dans le plan horizontal). Dans l'état, nous expliquons ce résultat par le fait que ces formes sont mieux à même de rendre compte de déformations non symétriques par rapport à l'axe vertical, voire de légers changements de l'inclinaison de la goutte. La forme n°2, du fait de sa symétrie, ne peut absolument pas rendre compte de ces deux types d'effets. Pour lever cette ambiguïté, il faudra à terme introduire un deuxième angle d'Euler dans le modèle VCRM. Quoiqu'il en soit, avec le modèle ellipsoïdale, l'accord moyen trouvé sur toute des diamètres allant de 380 à 50  $\mu\text{m}$  et les 5' de l'expérience est de  $-5,6 \pm 6,3 \mu\text{m}$  sur le diamètre équivalent sphérique et  $-0.57 \pm 2,0^\circ\text{C}$  sur la température ! Des résultats similaires ont été obtenus sur une plage de températures allant de 20-65°C.

## 4 Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, projet AMO-COPS (ANR-13-BS09-0008-02 et -01).

## References

- [1] Gouesbet, G. and F.R.A. Onofri, Laser-light and Interactions with Particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015. 162: p. 1-7.
- [2] Ren, K.F., et al., Vectorial complex ray model and application to two-dimensional scattering of plane wave by a spheroidal particle. *Opt. Lett.*, 2011. 36(3): p. 370-372.
- [3] Onofri, F.R.A., et al., Physical-optics approximation of near-critical-angle scattering by spheroidal bubbles. *Opt. Lett.*, 2012. 37(22): p. 4780-4782.
- [4] Onofri, F.R.A., et al., Experimental validation of the vectorial complex ray model on the inter-caustics scattering of oblate droplets. *Optics Express*, 2015. 23(12): p. 15768-15773.
- [5] Yang, M., et al., Comparison of scattering diagrams of large non-spherical particles calculated by VCRM and MLFMA. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2015. 163(143-153).
- [6] Gaubert, Q., et al. Caractérisation par techniques PIV et diffractométrie arc-en-ciel de l'évaporation de gouttes de fluides purs et complexes piégées dans un champ acoustique. in 15ème édition du Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL) 2016. ONERA Toulouse, France.
- [7] Nye, J.F., Rainbow scattering from spheroidal drops-an explanation of the hyperbolic umbilic foci. *Nature* 1984. 312(5994): p. 531-532.
- [8] Marston, P.L. and E.H. Trinh, Hyperbolic umbilic diffraction catastrophe and rainbow scattering from spheroidal drops. *Nature*, 1984. 312: p. 529-531.
- [9] Yu, H., F. Xu, and C. Tropea, Optical caustics associated with the primary rainbow of oblate droplets: simulation and application in non-sphericity measurement. *Optics Express*, 2013. 21(22): p. 25761-25771.

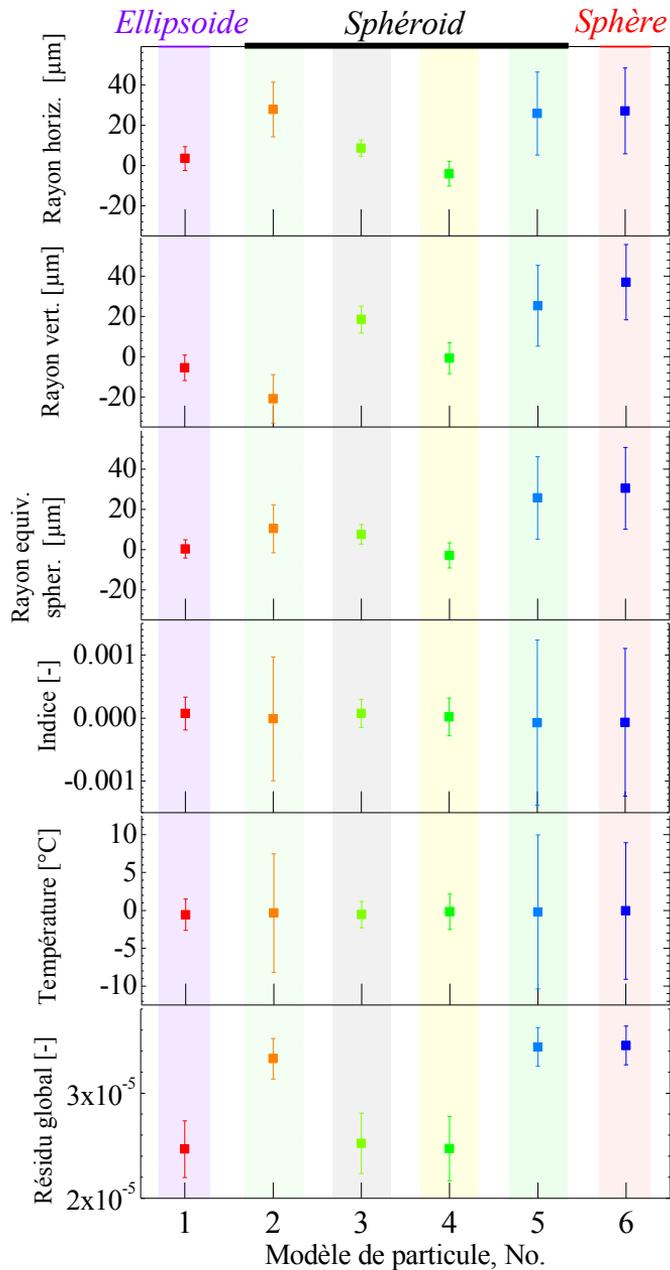


Figure 3: Moyenne et écart type de la différence entre paramètres estimés et paramètres nominaux d'une goutte d'eau s'évaporant en 5' à  $T=29^{\circ}\text{C}$  avec  $H=60\%$ . VCRM est utilisé pour inverser les données expérimentales avec différentes hypothèses sur le modèle de forme de la goutte: (1) ellipsoïde arbitraire, (2-5) sphéroïdes avec des orientations particulières et (6) sphère.