

Instrumentation optique Lagrangienne pour l'étude de la granulométrie d'un écoulement chargé en particules

D. Chareyron^a, J.-L. Marié^b, M. Lance^b, C. Fournier^c

a. Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, 46 allées d'Italie, 69 007 LYON

b. Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique de l'Ecole Centrale de Lyon, 69 364 ECULLY

c. Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet 42 000 ST ETIENNE

Résumé :

Nous présentons une instrumentation optique permettant de mesurer, d'un point de vue Lagrangien, l'évolution de la granulométrie d'un écoulement chargé en gouttelettes. La métrologie utilisée est un montage d'holographie numérique en ligne, avec un algorithme de reconstruction des hologrammes original basé sur une méthode problème inverse. L'expérience a été menée avec des gouttelettes d'eau puis de fréon dans un écoulement turbulent homogène isotrope. Cette technique apporte aussi l'avantage d'offrir une visualisation dynamique du champ thermique dans le sillage des objets étudiés.

Abstract :

We present an optical technique capable of measuring 3D trajectories and size evolution of a dilute flow of droplets dispersing in a high Reynolds number turbulence, from a Lagrangian point of view. The technique used is an in-line digital holographic set-up, with an original reconstruction algorithm based on an inverse-problem approach. The experiment has been performed with water and freon droplets in a locally well defined homogeneous, nearly isotropic, turbulence. This technique allows to visualise the thermal wakes behind the droplets which are tracked.

Mots clefs : Mesures Lagrangiennes ; Holographie Numérique

1 Introduction

L'étude de la granulométrie d'un écoulement chargé en particules est un élément déterminant tant pour appréhender des phénomènes comme la dispersion de particules dans l'atmosphère que pour des applications industrielles. Par exemple, la polydispersion d'un spray de gouttelettes de carburant dans la chambre de combustion d'un moteur est un facteur déterminant dans l'optimisation du processus de combustion. L'industrie des produits pharmaceutiques et alimentaires sous forme lyophilisée a besoin de ces diagnostics pour assurer stabilité, solubilité et texture finale désirées pour les poudres créées. Les principales instrumentations utilisées adoptent souvent un point de vue Eulérien, qui ne permet pas toujours d'apporter une compréhension très claire des phénomènes physiques mis en jeu [1]. Nous présentons ici un montage permettant d'effectuer des mesures en suivant des gouttelettes le long de leurs trajectoires et d'accéder ainsi à leurs vitesses, leurs accélérations et à l'évolution de leurs diamètres au cours du temps.

2 Holographie numérique

2.1 Dispositif expérimental

On s'intéresse dans ce montage à l'étude Lagrangienne de l'évaporation de gouttelettes dans un écoulement turbulent homogène isotrope avec de fortes fluctuations de vitesses. L'holographie en ligne, utilisée ici, est simple de mise en œuvre, ne nécessite qu'une faible puissance d'illumination car le capteur est placé directement face au laser, est robuste aux vibrations, et s'applique bien à des

objets de petite taille dans un écoulement dilué. La "boîte à turbulence", dans laquelle les gouttelettes sont étudiées, est décrite en détail dans Goepfert et al. [5]. Le dispositif a été inspiré des travaux de Hwang et Eaton [6], et consiste en une méthode simple et élégante pour générer une turbulence sans vitesse moyenne, avec de fortes fluctuations de vitesse, un nombre de Reynolds relativement élevé et assurant une bonne homogénéité. L'écoulement turbulent est créé par des jets synthétiques réalisés à l'aide de haut-parleurs sur lesquels sont montées des plaques percées d'un réseau de trous, fig. 1. Les haut-parleurs (woofers) sont alimentés par un signal sinusoïdal de basse fréquence, de même phase et d'intensité variable. Les membranes agissent comme des pistons et poussent et aspirent l'air dans la cavité de façon dissymétrique produisant un jet. Les six jets synthétiques ainsi produits se mélangent au centre du dispositif pour venir former à cet endroit une turbulence de forte intensité. La zone pour laquelle on est relativement proche d'une turbulence homogène isotrope est un volume de $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$. Le tableau 1 résume les grandeurs caractéristiques de la turbulence obtenues par Laser Doppler Velocimetry et Particle Image Velocimetry. Ces grandeurs ont été estimées à partir de l'énergie cinétique q^2 , et du taux de dissipation ϵ .

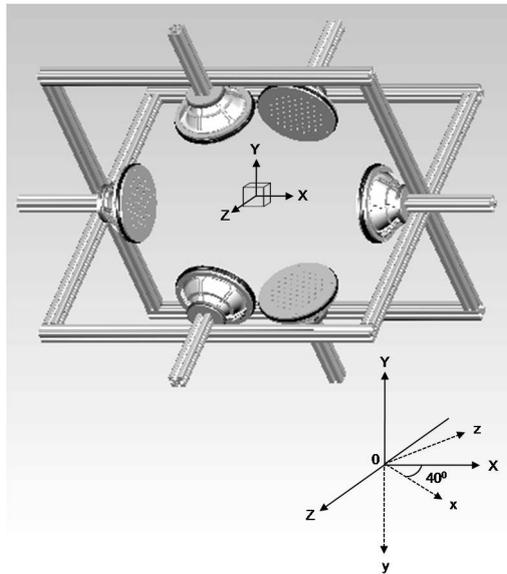


FIGURE 1 – Mise en place de l'holographie dans la "boîte à turbulence"

$q^2(m^2s^{-2})$	$\epsilon(m^2s^{-3})$	$\lambda(mm)$	Re_λ	$T_E(ms)$	$\Lambda(mm)$	$\eta_k(mm)$	$\tau_k(ms)$
2.12	5.78	5.2	293	56	47	0.16	1.60

TABLE 1 – Paramètres de l'écoulement. q^2 : énergie cinétique, ϵ : taux de dissipation, λ : micro-échelle de Taylor, R_λ : nombre de Reynolds basé sur l'échelle de Taylor, T_E : temps de retournement des tourbillons, Λ : échelle intégrale, η_k : échelle spatiale de Kolmogorov, τ_k : échelle temporelle de Kolmogorov.

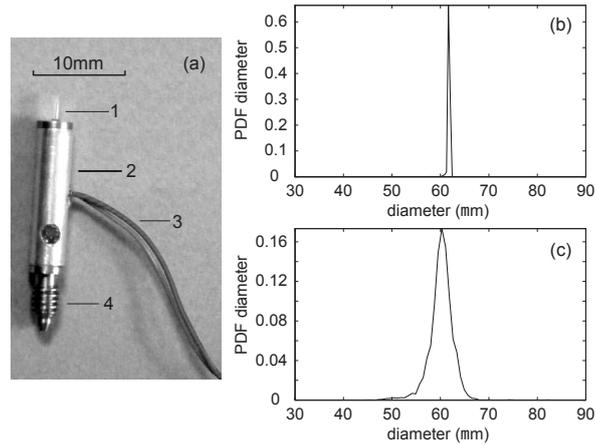


FIGURE 2 – (a) Injecteur piezoelectrique, Fonction de densité de probabilité des tailles des gouttes produites avec un capillaire de $60 \mu\text{m}$, (b) dans l'air au repos, (c) avec turbulence. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un anémomètre Phase Doppler.

L'injection des particules dans le domaine turbulent est réalisée par un injecteur piezoélectrique commandé par un générateur d'impulsions, fig. 2 (a). Dans cette utilisation dite "à la demande", les gouttes sont éjectées à la fréquence des impulsions et leur diamètre est semblable à la taille du capillaire de l'injecteur. Deux diamètres de gouttes sont présentés dans cette étude : $60 \mu\text{m}$ pour les gouttes d'eau, et une distribution un peu plus polydisperse centrée sur $200 \mu\text{m}$ pour l'étude de l'évaporation (fréon R114). Une mesure à l'aide d'un anémomètre Phase Doppler a permis de montrer que la présence de turbulence affecte la fonction de densité de probabilité des gouttes injectées, et a tendance à l'élargir, fig.2 (b) et (c).

Le montage d'holographie numérique en ligne a été mis en place à l'aide de la collaboration de l'équipe de Corinne Fournier du laboratoire Hubert Curien (St Etienne) [4]. Pour des raisons d'accès optique, l'axe de l'holographie fait un angle de 40° avec le dispositif générant la turbulence, fig. 1. Le faisceau laser est élargi à l'aide d'une lentille divergente de focale 12 mm. La qualité de l'illumination ne nécessite pas ici l'utilisation d'un filtre spatial. Le capteur numérique de la caméra est placé face au faisceau lumineux et vient enregistrer les figures d'interférences créées entre l'onde de référence et l'onde diffractée par les objets. La méthode de reconstruction des hologrammes repose sur une approche problème inverse développée par Soulez et al. [9] [10]. Cet algorithme suit 3 étapes :

1. La particule la plus facile à détecter est repérée à l'aide d'une restitution numérique basée sur le modèle de Fresnel. On a ainsi une première estimation du jeu de paramètres de la goutte $\{x, y, z, d\}$ où x, y, z correspondent à la position de la particule dans le volume éclairé et d la valeur de son diamètre.
2. Ensuite la position de cette particule est affinée grâce à un processus itératif qui minimise la distance entre l'hologramme enregistré et le modèle de diffraction de la particule étudiée.
3. La contribution de la particule est ensuite soustraite de l'image. Ceci permet notamment d'améliorer le rapport signal sur bruit à chaque gommage de particule. Il a été ainsi possible de détecter des particules en dehors du champ de la caméra.

2.2 Résultats

La technique a tout d'abord été validée avec des gouttelettes d'eau [2]. Les images ont été enregistrées à l'aide d'une caméra rapide NAC (1280×1024 pixels, 10 bits, taille du pixel : 21.7 microns) à la fréquence de 1 kHz. Le volume est éclairé par un laser continu Millennia IIs à 532 nm. Une fois la reconstruction des hologrammes achevée, un algorithme de tracking a été mis au point. Une simple recherche du plus proche voisin s'est révélée suffisante et fonctionnelle du fait du caractère très dilué

de l'écoulement. Une trajectoire typique est représentée fig.3. On remarque que la mesure du diamètre n'évolue que très peu le long des trajectoires. Dans cet exemple nous étudions des gouttelettes d'eau à température ambiante et dans un écoulement très dilué. On ne s'attend pas à voir de l'évaporation ou de la coalescence. Les petits écarts sur le diamètre correspondent aux bruits de mesure (qualité de l'image de la particule, position en hors-champ,...) qui restent difficiles à quantifier. Afin d'évaluer la précision estimée sur chaque trajectoire, on a représenté l'évolution du diamètre des gouttes, en pourcentage, le long de chacune des trajectoires, i.e. $(d - \langle d \rangle) / \langle d \rangle$, où d représente le diamètre détecté à chaque pas de temps de chaque trajectoire et $\langle d \rangle$, le diamètre moyen sur la trajectoire donnée, fig.4. L'écart type de la distribution des diamètres mesurés est de 1.24 microns pour des gouttes de $60 \mu\text{m}$. Sur ce montage la précision obtenue par l'holographie est comparable à celle de l'interférométrie par défaut de mise au point [3].

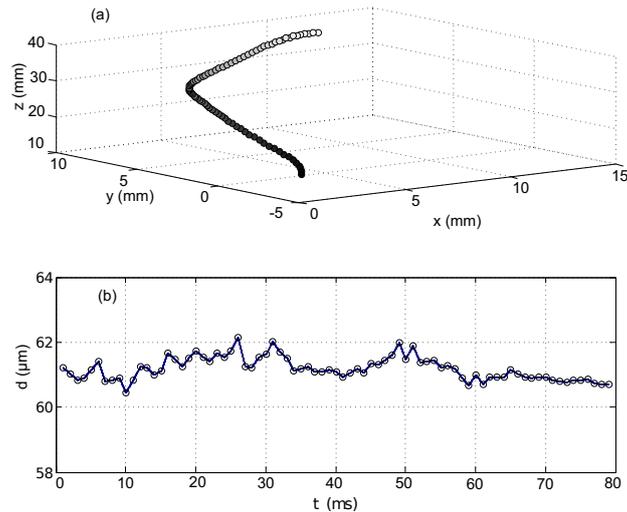


FIGURE 3 – (a) Exemple de trajectoire (goutte d'eau, $60 \mu\text{m}$) chronologiquement du blanc au noir. (b) mesure du diamètre à chaque pas de temps.

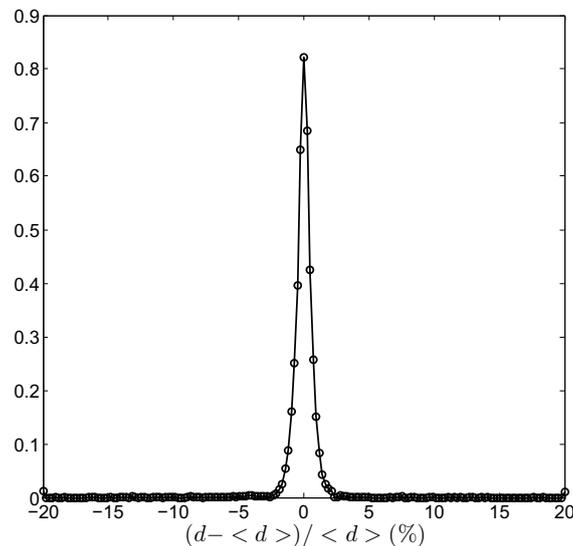


FIGURE 4 – Evolution Lagrangienne du diamètre)

Les premiers essais avec des gouttes dont on s'attend à ce que le diamètre varie au cours du temps ont été réalisés à l'aide de l'utilisation d'un fréon (R114) dont le point d'ébullition est de 3.8°C à pression atmosphérique. Même s'il s'avère que les hologrammes enregistrés montrent que, pour l'instant,

les gouttes sont encore au stade de montée en température, les images contiennent des informations intéressantes. En effet, derrière chacune des gouttes, il est possible de voir la présence d'un sillage thermique, fig. 5.

L'image de ce sillage correspond à un objet de phase. Une mise au point numérique dans le plan de la goutte n'apporte aucune information supplémentaire car l'image de ce sillage ne correspond pas à une figure d'interférence créée par un objet mais à un gradient d'indice derrière la goutte. Ainsi, grâce à la matérialisation du sillage, on accède localement à des informations sur la phase porteuse en 2D. Un deuxième axe de visualisation par holographie permettrait de connaître la direction 3D de la vitesse relative de l'écoulement dans le référentiel de la goutte. De plus la persistance des sillages loin derrière les gouttes vient renseigner sur la topologie des champs de concentration, et par voie de conséquence sur le taux d'évaporation.

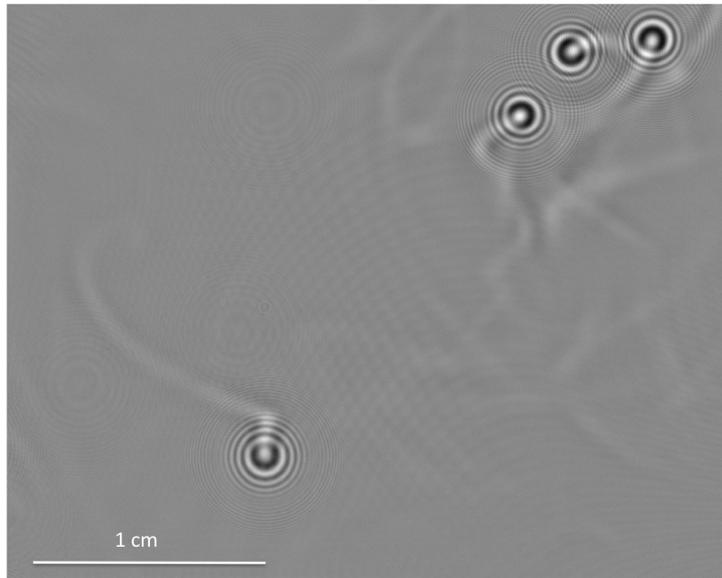


FIGURE 5 – Exemple d'hologramme de gouttes de fréon de $230 \mu\text{m}$ de diamètre

3 Conclusions

Nous avons présenté ici une instrumentation Lagrangienne adaptée à des écoulements faiblement chargés en particules. Les précisions obtenues avec des gouttelettes de diamètre constant dans le temps viennent confirmer la pertinence de ce montage. De plus, les informations de phase portées dans le sillage des objets étudiés permettent d'avoir une visualisation dynamique du champs thermique. Les études expérimentales réalisées jusqu'ici, adoptant un point de vue Lagrangien, sont assez rares, il est alors important de proposer une base de données afin de comparer nos résultats avec d'autres études expérimentales mais aussi afin de permettre la validation de modèles numériques Lagrangiens.

Références

- [1] M. Birouk and I. Gökalp. 2006 Current status of droplet evaporation in turbulent flows. *Progr. Energy Comb. Sci.*, **32** 408-423
- [2] D. Chareyron and J.-L. Marié and M. Lance and J. Gire and C. Fournier and L. Denis 2009 Utilisation de l'holographie numérique pour des mesures Lagrangiennes de gouttelettes dans une turbulence homogène isotrope. *19ieme congrès Français de Mécanique*

- [3] D. Chareyron. 2009 Développement de méthodes instrumentales en vue de l'étude Lagrangienne de l'évaporation dans une turbulence homogène isotrope., *Ecole Centrale de Lyon*
- [4] D. Chareyron and J.L.Marié and J.Gire and C.Fournier and N.Grosjean and L.Denis and L.Mèès and M.Lance. 2010 Mesures Lagrangiennes de gouttes évaporantes dans une turbulence homogène isotrope par holographie numérique. *1ere rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides - CORIA, Rouen, France.*
- [5] C. Goepfert and J.-L. Marié and D. Chareyron and M. Lance. 2009 Characterization of a system generating a homogeneous isotropic turbulence field by free synthetic jets. *Exp. Fluids*, **48** 809-822
- [6] W. Hwang and J.K. Eaton. 2004 Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow. *Exp. Fluids*, **36** 444-454
- [9] F. Soulez and L. Denis and C. Fournier and E. Thiébaud and C. Goepfert. 2007 Inverse-problem approach for particle digital holography : accurate location based on local optimization. *J. Opt. Soc. Am.*, **24** 1164-1171
- [10] F. Soulez and L. Denis and E. Thiébaud and C. Fournier and C. Goepfert. 2007 Inverse problem approach in particle digital holography : out-of-field particle detection made possible. *J. Opt. Soc. Am.*, **24** 3708-3716