

MESURES LAGRANGIENNES DE GOUTTES ÉVAPORANTES DANS UNE TURBULENCE HOMOGENE ISOTROPE PAR HOLOGRAPHIE NUMÉRIQUE

D. Chareyron¹, J.L.Marié¹, G.Gire², C.Fournier², N.Grosjean¹, L.Denis³, L.Mèès¹, 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, 18 rue Pr Benoit Lauras, F-42000, St Etienne, France.*

³ *Centre de Recherche Astronomique de Lyon UMR5574, CNRS - ENSL - Université Claude Bernard Lyon 1, France*

delphine.chareyron@ens-lyon.fr, jean-louis.marie@ec-lyon.fr, corinne.fournier@univ-st-etienne.fr,

MOTS CLES

Mesures Lagrangiennes, Evaporation, Turbulence Homogène Isotrope, Holographie Numérique.

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. L'expérience a été menée dans un domaine turbulent homogène isotrope d'environ 50mm³ généré par 6 jets synthétiques [1]. Le montage optique utilisé est un montage en ligne à un bras adapté aux conditions expérimentales. Les séquences d'hologrammes de gouttes ont été enregistrées avec des caméras numériques rapides (1- 3 kHz.). La restitution et la reconstruction 3D de ces séquences a été réalisée à l'Université Hubert Curien de St Etienne, au moyen d'un algorithme de type méthode inverse [2]. Le suivi temporel des positions et des diamètres obtenus au moyen d'un programme de tracking que nous avons développé, nous ont permis de déterminer les trajectoires 3D des gouttes et l'évolution des diamètres au cours du temps. La méthode a d'abord été validée dans un cas non-évaporant, avec des gouttes d'eau monodisperses de 60 µm, injectées au moyen d'un injecteur piézoélectrique à la demande. Des statistiques Lagrangiennes sur 2000 trajectoires ont été obtenues. Les pdf d'accélération confirment une incertitude en z plus importante, qui peut cependant être compensée par un lissage des trajectoires dans cette direction. Les diamètres mesurés le long des trajectoires restent dans ce cas constant à 1.6% près, indiquant une très bonne précision sur cette grandeur. Une campagne de mesure a ensuite été conduite avec des gouttes évaporantes de Fréon. Les hologrammes font apparaître des sillages de gaz évaporant qui montrent les fluctuations de vitesses vues par les gouttes. Une première courbe d'évolution du diamètre le long d'une trajectoire a été obtenue. Celle-ci suit en moyenne une loi classique en D² de type Spalding, tendance qui demandera à être confirmée.

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. Les gouttes en interagissant avec les structures turbulentes suivent des trajectoires différentes et échantillonnent des vitesses relatives différentes, conduisant dans certains cas à des accumulations préférentielles dans certaines zones. Ces effets vont affecter les transferts locaux de chaleur, si bien que chaque goutte s'évaporerait différemment selon la trajectoire suivie. Dans le même temps, l'évaporation modifie les forces instantanées agissant sur la goutte, modifiant ainsi sa trajectoire dans un couplage inverse complexe. La plupart des expériences sur l'évaporation utilisent des métrologies Eulériennes. Celles-ci donnent accès à des paramètres locaux tels que vitesses, diamètres et températures [3, 4, 5, 6] qui ne permettent pas toujours d'apporter une compréhension très claire des phénomènes physiques. Notre objectif est d'effectuer des mesures en suivant les gouttes le long de leurs trajectoires et d'accéder ainsi à leur vitesse, leur accélération et à l'évolution de leur diamètre au cours du temps. De telles

mesures Lagrangiennes ont récemment été menées sur des particules non-évaporantes dans des écoulements turbulents au moyen de techniques tels que tracking acoustique [7], imagerie rapide [8], et holographie numérique [9,10]. Cette dernière dont l'utilisation en mécanique des fluides est prometteuse a surtout été appliquée jusqu'à un passé très récent aux diagnostics sur les particules ou comme une technique de vélocimétrie [11, 12, 13, 14, 15].

II. MONTAGE EXPERIMENTAL

II.1 Caractéristiques de la turbulence et de l'injection

L'étude est réalisée dans une turbulence homogène isotrope générée à l'aide de jets synthétiques [1]. Cette installation, inspirée par les travaux de Hwang & Eaton [16] est une chambre de turbulence ouverte constituée de 6 haut-parleurs (woofers) se faisant face deux à deux (Fig.1 gauche). Les six jets synthétiques ainsi générés se rejoignent au centre de la structure ($X=Y=Z=0$) où ils créent un domaine turbulent homogène isotrope d'environ 50 mm^3 . La vitesse est en moyenne quasiment nulle (0.04 m/s) dans le domaine avec des fluctuations RMS de l'ordre du m/s et une échelle intégrale de l'ordre de 45 mm . Les caractéristiques de la turbulence mesurées par PIV sont résumées Table1.

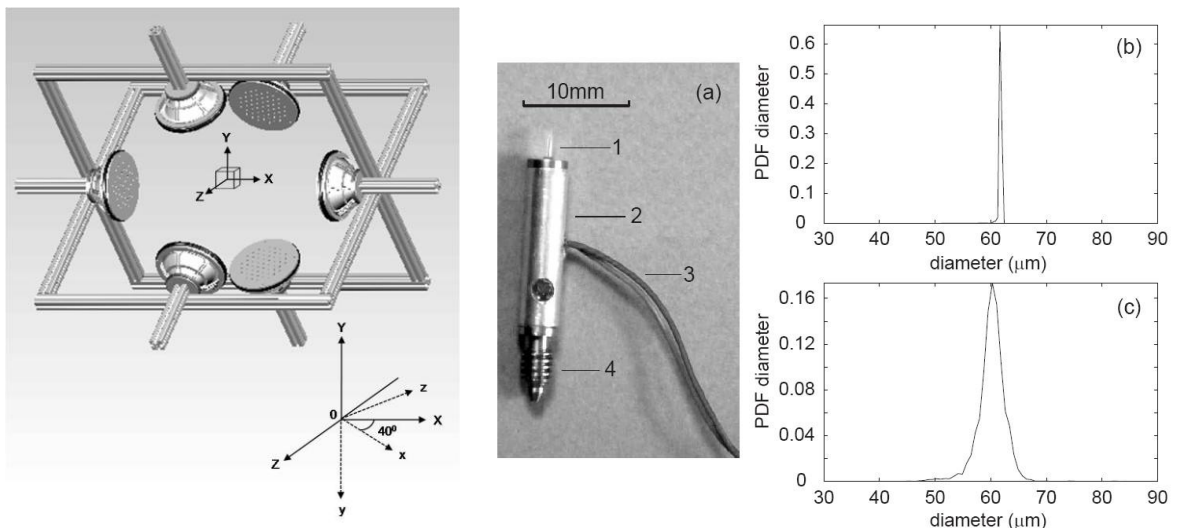


Figure 1. À gauche, la chambre de turbulence : le cube au centre matérialise le domaine de turbulence (50mm^3). À droite, l'injecteur piézoélectrique (a), les pdf de tailles de gouttes d'eau produites avec un capillaire de $60 \mu\text{m}$ et mesurées par PDA, (b) dans l'air au repos (diamètre moyen : $61.7 \mu\text{m}$, valeur RMS : $0.5 \mu\text{m}$) ; (c) et avec turbulence (diamètre moyen : $60.1 \mu\text{m}$, valeur RMS : $2.6 \mu\text{m}$).

$q^2 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$\varepsilon \text{ (m}^2/\text{s}^3)$	L(mm)	$t_E \text{ (ms)}$	Re_λ	$\lambda \text{ (mm)}$	$\tau_\eta \text{ (ms)}$	$\eta \text{ (mm)}$
2.12	5.78	47.1	183	293	5.20	1.60	0.155

Table 1: Caractéristiques de la turbulence ; L : échelle intégrale, λ : échelle de Taylor, η : échelle de Kolmogorov, Re_λ : nombre de Reynolds, q^2 : énergie turbulente, ε : taux de dissipation .

II.2 Injection des gouttes

Pour que l'évaporation des gouttes puisse être étudiée d'un point de vue Lagrangien, on doit être capable de mesurer leur diamètre le long d'une trajectoire. Afin de montrer que l'holographie en ligne permet une telle mesure avec une bonne précision, elle a été testée avec des gouttes bien contrôlées en taille et monodispersées. Ces gouttes sont générées avec un générateur piézoélectrique, de type injecteur à la demande MJ-AT-01 de MicroFab Technologie, avec un tube capillaire de $60 \mu\text{m}$. En non-évaporant (eau), les gouttes sont

relâchées à $X=0$, $Z=0$, $Y=40$ mm au dessus du domaine turbulent, de façon à ce qu'elles n'aient pas un comportement balistique en pénétrant dans le domaine, tout en conservant une quantité de mouvement suffisante pour ne pas être repoussées à l'extérieur du domaine. En absence de turbulence (HP éteints) la taille moyenne de ces gouttes mesurée par PDA est de $61,7 \mu\text{m}$ avec un écart-type de l'ordre de $\pm 0.8\%$ et de $60.1 \mu\text{m}$ avec un écart-type de l'ordre de $\pm 2.2\%$ avec turbulence. Le caractère monodispersé est donc bien vérifié.

Les essais en évaporant utilisent du Fréon R114 dont la température d'ébullition est de l'ordre de 4°C . Le Fréon gazeux sortant de sa bouteille de stockage sous pression est d'abord liquéfié, puis acheminé à basse température par un circuit de refroidi jusqu'à l'injecteur. Dans ce cas, la taille des gouttes ne peut être véritablement contrôlée, du fait d'instabilités dans le circuit et des problèmes de givrage. Les gouttes produites ne sont plus monodispersées et en moyenne plus grosses que pour l'eau ($200\text{-}300 \mu\text{m}$). Pour favoriser leur rentrée dans le domaine turbulent elles sont injectées du côté d'un des HP ($X=-40$ mm, $Y=40$ mm, $Z=0$ mm).

II.3 Montage holographique

Nous avons choisi d'utiliser un montage en ligne, car répondant mieux aux conditions difficiles de notre expérience et plus facile à implémenter sur le dispositif. L'écoulement est éclairé avec un laser solide Millenia IIs ($\lambda=532$ nm), selon l'axe z faisant pour des raisons d'accès optique un angle de 140° avec l'axe Z du domaine, (Fig. 1). Le faisceau laser est ensuite élargi à l'aide d'une lentille divergente de 12 mm de focale. La qualité de l'illumination obtenue ne nécessite pas ici l'utilisation d'un filtre spatial. Le capteur numérique de la caméra est placé face au faisceau à une distance de 580 mm de l'injecteur de gouttes. Pour une meilleure qualité des images, aucune lentille convergente n'est ajoutée sur le banc optique, ce qui implique une légère divergence du faisceau. Cette divergence introduit un grossissement qui est ici de 1.42, ce qui réduit selon x et y la taille effective du champ observé. Cette réduction est compensée par une plus grande efficacité des détections hors champ rendues possibles avec la méthode de restitution employée, mais qui nécessite une très bonne qualité de faisceau.

Lors de l'étude avec les gouttes d'eau, les images ont été enregistrées à l'aide d'une caméra NAC (capteur 1280×1024 pixels, pixel $21.7 \mu\text{m}$, fill factor 70 %, 10 bits). La taille du capteur est donc de $27.77 \text{ mm} \times 22.2 \text{ mm}$. À cause de la divergence du faisceau la taille de champ observé se réduit à $19.5 \text{ mm} \times 15.6 \text{ mm}$. Après traitement des images par l'algorithme de reconstruction, la taille de champ de détection des particules s'étend à $42 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$.

La restitution numérique de l'hologramme est réalisée par un algorithme itératif utilisant une approche par problème inverse [2]. Les atouts majeurs de cette méthode par rapport à d'autres méthodes plus conventionnelles en holographie (transformée de Fresnel, de Fourier fractionnaire, ou en ondelettes) est d'accroître la précision du positionnement dans la direction z et la taille du domaine imagé par la restitution de particules hors champ. Cet algorithme se découpe en trois phases qui sont (Fig.2) :

- une localisation grossière de la position et de la taille de la ou des particules la ou les plus facilement détectables.
- Une détection fine de cette ou ces particules à l'aide d'une technique d'optimisation locale. L'approche par problème inverse conduit alors au jeu de paramètres (position, taille) qui modélise au mieux l'hologramme observé.
- La contribution de cette ou ces particules est ensuite gommée de l'hologramme.

La même procédure est répétée pour détecter et localiser une ou des nouvelles particules dans l'image jusqu'à ce qu'aucune particule ne soit plus détectée. Chaque étape de gommage accroît le rapport signal sur bruit, ce qui rend la détection de particules hors champ possible grâce à cet algorithme. Sous certaines conditions, le champ de détection des particules peut atteindre 4 fois la taille du capteur [17].

Les trajectoires des gouttes sont obtenues en enregistrant une série d'hologrammes sur un temps moyen d'environ une seconde. Le traitement de ces hologrammes fournit à chaque instant considéré, un ensemble de positions à partir desquelles les trajectoires sont reconstituées via un algorithme de suivi simple, basé sur un critère de proximité. Ce choix est justifié par le faible nombre de gouttes présentes dans le domaine turbulent. Un seuil est

utilisé pour gérer la question de l'apparition et la disparition des gouttes dans le domaine turbulent.

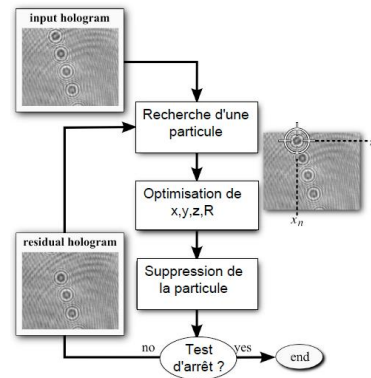


Figure 2. Algorithme de traitement des hologrammes utilisé dans la méthode inverse [2]

Les hologrammes de gouttes de Fréon ont été enregistrés avec une caméra Photron SA5 (1024x1024, 12 bits, pixel 20 μm , fill factor 65%, 3KHz) plus rapide que celle employée pour l'eau.

III. RESULTATS

III.1 Cas non-évaporant (gouttes d'eau)

Le nombre de trajectoires reconstruites est de 2090 (Fig.3a), ce qui a nécessité le traitement de 20000 hologrammes. Le temps moyen de résidence des gouttes dans le domaine turbulent est de l'ordre de 13 ms, soit du temps Lagrangien ($T_L \approx 30$ ms) avec cependant peu de trajectoires très longues. Les premières statistiques Lagrangiennes portant sur les déplacements, pdf de vitesse, d'accélération, et les corrélations de vitesses ont été tirées de ces trajectoires. On voit par exemple Fig.3b qu'on retrouve des résultats classiques dans la littérature, à savoir des accélérations Gaussiennes selon x , y avec des événements rares très intenses. Dans la direction z (axe du montage holographique), les accélérations s'écartent de de celles observées dans les deux autres directions, ce qui est à mettre sur le compte de la moins bonne précision sur la position dans cette direction ($z_{\text{RMS}} = 60\mu\text{m}$) qu'en x,y ($x_{\text{RMS}} = y_{\text{RMS}} = 3\mu\text{m}$). Il s'agit ici de la précision théorique estimée. Il convient cependant de noter que cette moins bonne précision en z peut être compensée en lissant les trajectoires auxquels cas les accélérations redeviennent isotropes dans les trois directions, ce qui n'est pas le cas dans l'expérience de Lu et al. [10].

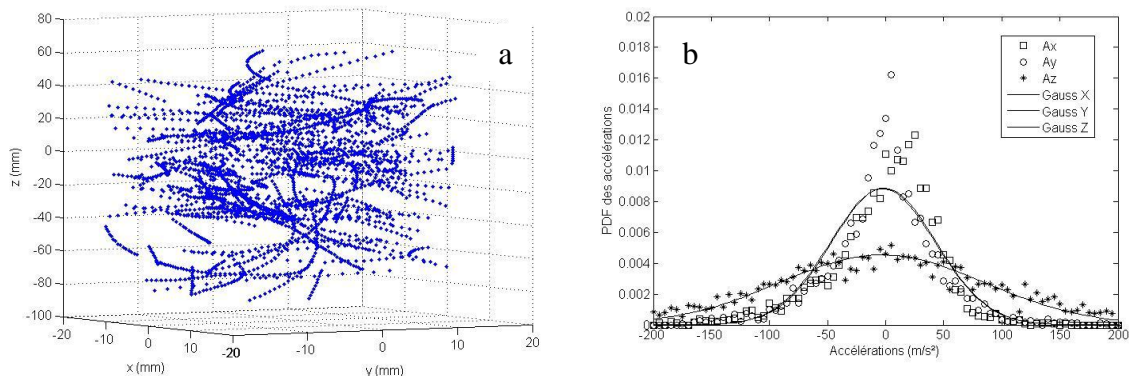


Figure 3. (a) Trajectoires reconstruites de gouttes d'eau de 60 μm : (b) pdf des accélérations

Nous avons également validé un élément tout à fait essentiel pour l'étude suivante avec évaporation, en vérifiant que le diamètre des gouttes d'eau restait constant le long de leur trajectoire (Fig.4a). Nous avons pour cela calculé le diamètre moyen pour chaque trajectoire et tracé l'évolution du diamètre des gouttes par rapport à ce diamètre moyen pour chaque trajectoire. On constate sur la Fig.4b que la variation de diamètre détecté au cours du temps

est excessivement faible, de l'ordre de 2%, ce qui nous assure que l'holographie est une technique très fiable pour étudier l'évaporation. La précision affichée sur la mesure des diamètres avec cette technique est $d_{RMS} = 1 \mu m$.

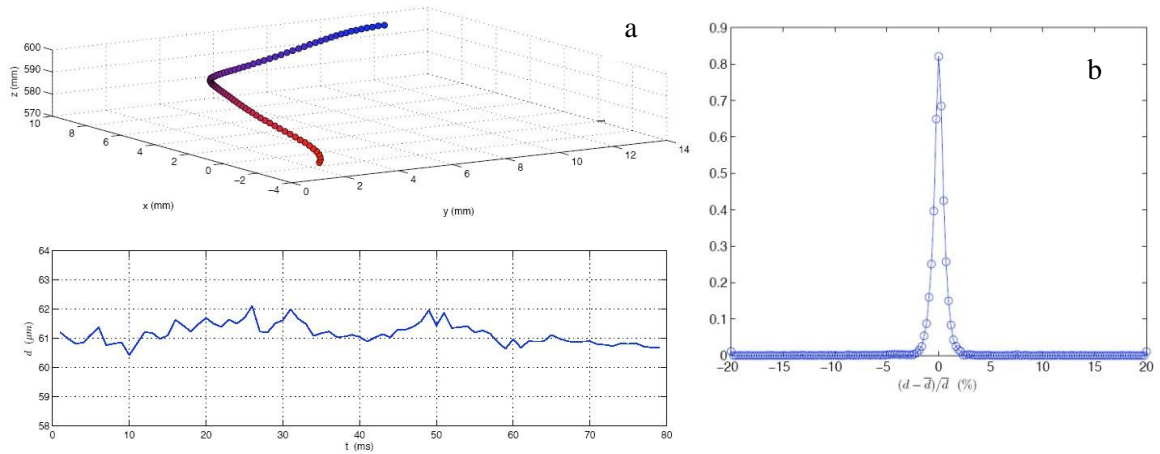
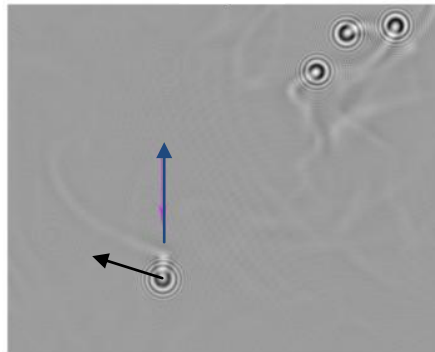


Figure 4: (a) : Exemple de trajectoire avec mesure du diamètre au cours du temps. (b) : pdf de $(d - \bar{d}) / \bar{d}$ pour l'ensemble des trajectoires.

III.2 Cas évaporant (gouttes de Fréon R114)

Les résultats obtenus avec le Fréon R114 sont particulièrement encourageants. Les hologrammes enregistrés (Fig.5a) mettent en évidence des sillages de gaz évaporant au voisinage de la goutte, qui sont liés à la variation de l'indice optique à l'interface air/Fréon. Ces sillages ont une orientation différente de la trajectoire des gouttes et permettent ainsi de visualiser l'orientation des fluctuations de vitesse instantanées vues par les gouttes et donc l'effet de croisement de trajectoires.



Flèche noire : vitesse de la goutte
Flèche bleue : vitesse relative

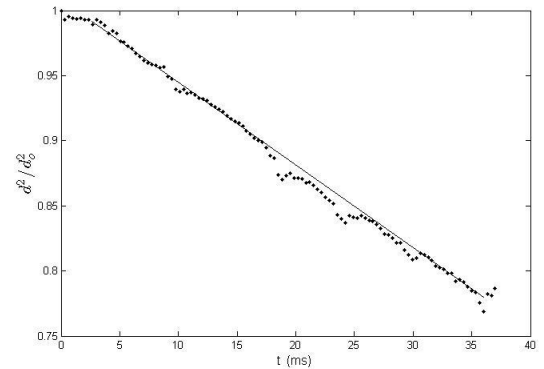
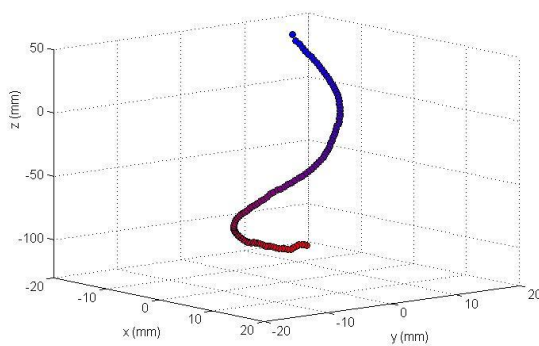


Figure 5: (a) Hologramme de gouttes de fréon (300 μm) ; (b) Trajectoire reconstruite ; (c): Décroissance du carré du diamètre au cours du temps (le long de la trajectoire). 岡岡岡 loi de type Spalding.

Par ailleurs, on voit sur l'exemple de trajectoire reconstruite Fig. 5b que le diamètre de la goutte diminue au cours du temps. La décroissance suit une loi moyenne de type Spalding

(Fig. 5c) avec des plateaux qui peuvent être attribués à la turbulence, mais dont l'origine exacte n'a pu être pour l'instant déterminée.

CONCLUSIONS

Les résultats présentés ici montrent que l'holographie numérique offre des perspectives particulièrement prometteuses pour l'étude Lagrangienne de la dispersion turbulente de particules avec changement de phase. Le cas de l'évaporation présenté en est un exemple. La technique en ligne utilisée est simple à mettre en œuvre et a permis d'accéder aux grandeurs Lagrangiennes souhaitées (positions 3D, diamètres). Bien que la précision en z soit améliorée par l'algorithme utilisé, elle reste encore insuffisante pour le calcul des accélérations. Mais ceci peut être compensé par un lissage de trajectoire. La précision sur la détermination des diamètres est quant à elle très satisfaisante. Enfin, les sillages évaporants semblent pouvoir apporter des informations supplémentaires qu'il conviendra d'exploiter.

REFERENCES

- [1] Goepfert C, Marié J.L., Chareyron D. & Lance M. (2010). Characterization of a system generating a homogeneous isotropic turbulence field by free synthetic jets. *Exp. Fluids*, **48**, 809-822.
- [2] Soulez F., Denis L., Fournier C., Thiébaud E. & Goepfert C. (2007). Inverse problem approach for particle digital holography : accurate location based on local optimization. *J. Opt. Soc. Am.*, **24**, 1164–1171.
- [3] Sommerfeld M., Qiu H.-H. (1998). Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow, *Int. J. Heat & Fluid Flow*, **19**, 10-22.
- [4] Guella S., Alexandrova S., Saboni A. (2008). Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air, *Int. J. Therm. Sci.*, **47**, 886-898.
- [5] Wu J.-S., Liu Y.-J., Sheen H.-J. (2001). Effects of ambient turbulence and fuel properties on the evaporation rate of single droplets, *Int. J. Heat & Mass Transfer*, **44**, 4593-4603.
- [6] Maqua C., Castanet G., Grisch F., Lemoine F., Kristyadi T., Sazhin SS. (2008). Monodisperse droplet heating and evaporation : Experimental study and modelling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **51**: 3932-3945.
- [7] 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.
- [8] Bourgoin M., Ouellette N.T., Xu H., Berg J., Bodenschatz E (2006). The role of pair dispersion in turbulent flow. *Science*, **311**, 835–838.
- [9] Gopalan B., Malkiel E., Katz J. (2008). Experimental investigation of turbulent diffusion of slightly buoyant droplets in locally isotropic turbulence. *Phys. Fluids*, **20**, 095102.
- [10] 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.
- [11] Müller J., Kebbel V., Jüptner W. (2004). Characterization of spatial particle distributions in a spray-forming process using digital holography, *Meas. Sci. Technol.*, **15**, 706-710.
- [12] Coupland J. M. (2004). Holographic particle image velocimetry : signal recovery from under-sampled CCD data, *Meas. Sci. Technol.*, **15**, 711-717.
- [13] Pu S. L., Allano D., Patte-Rouland B., Malek M., Lebrun D., Cen K. F. (2005). Particle field characterization by digital in-line holography : 3D location and sizing, *Exp. Fluids*, **39**, 1-9.
- [14] Palero V., Lobera J., Arroyo M. P. (2005). Digital image plane holography (DIPH) for two-phase flow diagnostics in multiple planes, *Exp. Fluids*, **39**, 397-406.
- [15] Katz J., Sheng J. (2009). Applications of holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **42**, 531-555.
- [16] Hwang W. and Eaton J.K. (2004). Creating homogeneous and isotropic turbulence without a mean flow. *Exp. Fluids*, **36**, 444–454.
- [17] Soulez F., Denis L., Thiébaud E., Fournier C., and Goepfert C. (2007). Inverse problem approach in particle digital holography : out-of-field particle detection made possible. *J. Opt. Soc. Am.*, **24**, 3708–3716.