



HAL
open science

Suivi Lagrangien de gouttes en évaporation: passage à l'échelle du traitement des hologrammes

Loïc Méès, Nathalie Grosjean, Cyril Mauger, Jean-Louis Marié, Corinne Fournier

► **To cite this version:**

Loïc Méès, Nathalie Grosjean, Cyril Mauger, Jean-Louis Marié, Corinne Fournier. Suivi Lagrangien de gouttes en évaporation: passage à l'échelle du traitement des hologrammes. Holophi5 : 5 ème rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2018, Montpellier, France. hal-02140833

HAL Id: hal-02140833

<https://hal.science/hal-02140833>

Submitted on 27 May 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.

Suivi Lagrangien de gouttes en évaporation: passage à l'échelle du traitement des hologrammes.

Loïc Méès¹, Nathalie Grosjean¹, Cyril Mauger¹, Jean-Louis Marié¹, Corinne Fournier².

¹LMFA, CNRS UMR 5509, Univ Lyon, INSA de Lyon, École Centrale de Lyon, F-69134 Écully, FRANCE

²Université Lyon, UJM-Saint-Étienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, Saint-Étienne, France

loic.mees@ec-lyon.fr

Mots clés

Évaporation, holographie numérique en ligne, problème inverse, turbulence.

Résumé

Des gouttelettes en évaporation dans une turbulence homogène et isotrope sont suivies grâce à un dispositif d'Holographie Numérique en ligne et une méthode de reconstruction de type «problème inverse». Les temps de calcul importants nécessaires à la reconstruction du volume de mesure à partir des hologrammes est un frein à la pleine exploitation de l'expérience. C'est pourquoi les séquences d'hologrammes sont traitées sur un ordinateur haute performance, sur plusieurs cœurs et en deux étapes, avec une détection grossière précédant une mesure plus précise. Ces outils permettent de traiter un grand nombre de données de manière automatique et de reconstruire un nombre suffisant de trajectoires pour obtenir des résultats statistiques sur l'évaporation des gouttelettes. Une première analyse de ces résultats est focalisée sur les courbes d'évaporation (évolution du diamètre au carré en fonction du temps) et de leur écarts à la linéarité (loi en d^2). Les gouttelettes sont classées en 3 catégories, selon que leur courbes d'évaporation sont linéaires ou linéaires en 2 ou 3 morceaux (qu'elles montrent 1 ou 2 changements de pente). Cette analyse permet de calculer un taux d'évaporation moyen et une distribution des taux d'évaporation, qui ne semblent pas dépendre du nombre de changements de pente observés.

I. Introduction

L'évaporation est au cœur de nombreux procédés dans des domaines très variés, de la production d'énergie à la santé. Le moyen le plus courant pour optimiser les phénomènes d'évaporation est de pulvériser le liquide sous forme de spray afin d'augmenter le rapport surface / volume et donc le transfert de masse. En général, l'écoulement dans lequel les gouttelettes du spray s'évaporent est turbulent. C'est un problème difficile. Dans un tel écoulement les gouttes ont des trajectoires complexes. Elles sont soumises à des fluctuations de vitesse, de pression et de concentration, qui varient d'une goutte à l'autre selon leurs trajectoires. On s'attend ainsi à ce que la manière dont une goutte s'évapore soit liée à sa trajectoire propre.

L'approche développée au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique pour étudier les phénomènes d'évaporation en présence de turbulence est expérimentale. Elle consiste à suivre les gouttes en évaporation dans une turbulence maîtrisée, de manière Lagrangienne [1]. Il s'agit ainsi de suivre les gouttes le long de leur trajectoire, en trois dimensions et d'en mesurer précisément le diamètre et la position au cours du temps. Pour réaliser ces mesures, notre choix s'est porté sur un dispositif d'holographie numérique en ligne, qui permet à l'aide d'un montage simple et robuste d'obtenir des informations dans un

volume à partir d'un seul hologramme. La précision de mesure requise pour cette étude est atteinte en abordant le problème de la restitution des hologrammes par une approche de type « problème inverse » [2, 3].

Dans sa version actuelle, l'expérience consiste à injecter des gouttelettes d'éther dans une turbulence quasi homogène et isotrope, à mesurer leurs positions et leur diamètres au cours du temps. Ces données peuvent être comparées aux prédictions d'un modèle simple d'évaporation, qui reproduit très bien les tendances observées, dans le cas de gouttes d'éther en chute libre s'évaporant dans un air humide [4]. En présence de turbulence, les prédictions du modèle ne sont pas toujours en accord avec les mesures. Une étude précédente [5] portant sur un faible échantillon de 10 trajectoires montre que certaines gouttes s'évaporent d'une manière conforme aux prédictions du modèle, quand d'autres montrent des fluctuations importantes et soudaines du taux d'évaporation qui s'écarte fortement des prédictions. Il semble donc que le modèle ne rende pas compte de toute la complexité de l'expérience ou que certaines des hypothèses sur lesquelles il repose ne soient pas vérifiées.

Bien que prometteurs, ces résultats restent limités à l'observation de quelques trajectoires. Les écarts constatés sur des cas particuliers doivent être confirmés et leur proportion précisé à partir d'un plus grand nombre de données. Malheureusement, la complexité des algorithmes appliqués à la reconstruction du volume de mesure est un frein à l'exploitation de l'expérience et de tout son potentiel. L'obtention de données statistiques, difficilement incontournables en matière de turbulence, repose sur notre capacité à traiter un grand nombre de données dans un temps raisonnable.

Pour réaliser ce passage à l'échelle, les séquences holographiques sont traitées sur un ordinateur haute performance. Le traitement s'effectue en deux étapes. La première étape consiste à détecter les trajectoires de gouttes de manière grossière et rapide à partir d'hologrammes dégradés en résolution. Les hologrammes sont alors triés pour ne conserver que les séquences dignes d'intérêt pour une seconde reconstruction, précise et non dégradée de ces trajectoires.

II. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est semblable à celui décrit dans la réf. [5], à ceci près que le faisceau d'éclairage n'est pas divergeant mais collimaté. Les gouttelettes d'éther sont injectées à proximité du volume de mesure situé à l'intersection de 6 jets synthétiques produit par 3 paires de haut-parleurs. Ce dispositif permet de générer une turbulence quasi homogène et isotrope autour du volume de mesure dont les dimensions approximatives sont $15 \times 25 \times 50 \text{ mm}^3$. Le nombre de gouttelettes présentes dans le volume de mesure varie au cours du temps entre 0 et 20. La concentration en gouttelettes reste a priori suffisamment faible pour ne pas tenir compte des effets collectifs. Les caractéristiques de la turbulence sont identiques à celles détaillées dans la ref. [5]. Le nombre de Reynolds est $Re_\lambda = 229$, l'échelle intégrale est $\Lambda = 49 \text{ mm}$ et l'échelle de Taylor est $\lambda = 5.1 \text{ mm}$, la vitesse moyenne est quasiment nulle et les fluctuations de vitesse sont de l'ordre de 0.8 ms^{-1} . Les échelles de Kolmogorov sont $\eta_k = 0.15 \text{ mm}$ (de l'ordre du diamètre des gouttes) et $\tau_k = 1.56 \text{ ms}$.

L'éclairage est assuré par un faisceau laser continu, collimaté et de longueur d'onde $\lambda = 532 \text{ nm}$. Les hologrammes sont enregistrés à la cadence de 6.2 kHz sur le capteur CMOS d'une caméra rapide située à environ 0.75 m du volume de mesure. Le dispositif permet d'enregistrer et de stocker en pleine résolution (1280×800) des séquences d'un peu moins d'une seconde.

III. Restitution des hologrammes.

Le principal avantage de l'holographie numérique en ligne est de pouvoir restituer les informations contenues dans un volume 3D à partir d'une seule empreinte 2D d'intensité lumineuse. Le plus souvent la restitution du volume repose sur un calcul de rétro-propagation et le volume est reconstruit plan par plan. Une autre manière de procéder est d'adopter une approche « problème inverse » en comparant l'hologramme expérimental à un hologramme modèle, défini par un petit nombre de paramètres. C'est cette méthode qui a été retenue, compte tenu de la précision requise pour les mesures (de diamètre notamment) et de la distance de travail importante imposée par le dispositif. En contrepartie de cette précision, le temps de traitement des hologrammes est de plusieurs dizaines de seconde par hologramme.

IV. Passage à l'échelle du traitement.

Sur une station de travail individuelle, le traitement d'une séquence d'une seconde, demande plusieurs jours. La stratégie adoptée jusqu'à présent reposait donc sur une pré-sélection des séquences à traiter. Pour rendre possible le traitement d'un grand nombre de données et le rendre moins dépendant de l'opérateur, les algorithmes développés en langage Python ont été portés sur un ordinateur parallèle et le traitement est réalisé en deux étapes. Une première étape fournit une détection rapide mais grossière des trajectoires de gouttes, en dégradant les résolutions spatiales et temporelles des données d'un facteur 4 pour les deux (on considère un hologramme sur 4 auquel on applique un binning 4x4). Cette étape permet de focaliser la seconde étape du traitement sur les hologrammes utiles, en ciblant les hologrammes qui contiennent effectivement des gouttes et des trajectoires suffisamment longues pour être analysées. La figure (1) montre un exemple de trajectoire de goutte reconstruite à partir d'une séquence dégradée en résolution et à partir d'une séquence en pleine résolution. Cette détection rapide est réalisée en moins de 45 minutes sur 16 processeurs. Elle permet en moyenne de limiter la restitution en pleine résolution à un tiers des hologrammes. Le temps nécessaire au traitement d'une seconde d'enregistrement (sans pré-sélection) devient ainsi inférieur à la journée, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour notre étude.

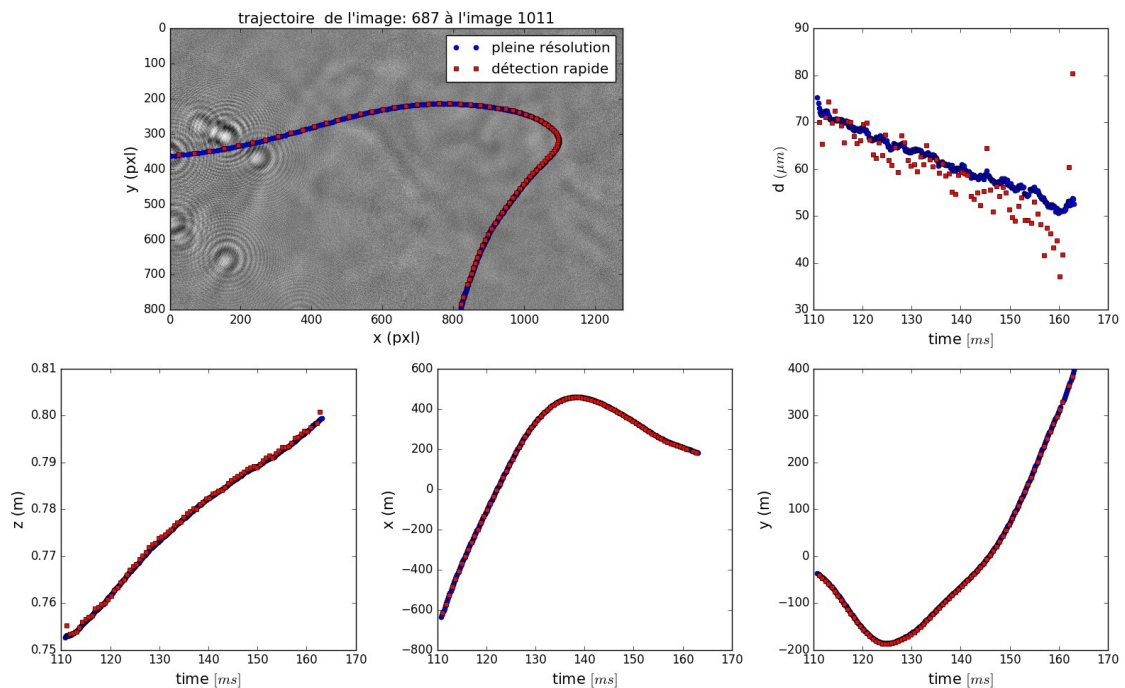


Figure 1 : Paramètres d'une goutte estimés à partir de la séquence d'hologrammes dégradée en résolution spatiale et temporelle (rouge) et à partir de la même séquence en pleine résolution (en bleu).

V. Premiers résultats statistiques.

Les résultats présentés ici sont issus de 50 minutes d'enregistrement (60 séquences d'hologrammes). Les hologrammes sont inversés et des trajectoires construites à partir de critères de proximités sur les paramètres (x, y, z, d) . Seules les trajectoires de gouttelettes d'une durée supérieure à 32 ms (200 images successives) sont conservées pour former un ensemble de 351 trajectoires. En première approximation, les transferts de masse à l'interface sont proportionnels à la surface d'échange. En conséquence le diamètre des gouttes porté au carré décroît linéairement avec le temps. Les gouttelettes d'éther en chute libre [4] vérifient bien cette loi en « d^2 ». Certaines trajectoires décrites dans la réf. [5] vérifient également cette loi mais pas toutes. Certaines gouttelettes montrent en effet des variations brutales de leur taux d'évaporation qui ne sont pas prédites par le modèle d'évaporation proposé dans les deux articles [4-5]. Il en va de même sur l'échantillon plus important de trajectoires considéré ici.

Différentes raisons peuvent être invoquées pour expliquer ces écarts. Le modèle tient compte des variations de la vitesse relative de la goutte dans l'écoulement mais il repose sur une hypothèse de quasi-stationnarité qui est potentiellement mise en défaut quand les variations de vitesse (en normes et en direction) sont brutales.

Pour l'ensemble des trajectoires détectées, une première analyse consiste à distinguer celles dont l'évolution du d^2 est quasi linéaire de celles qui sont mieux approchées par une fonction affine par morceaux et continue, en 2 ou en 3 morceaux. Ce tri est automatisé. La figure 2 montre 3 exemples de gouttelettes dont l'évolution du d^2 est linéaire en 1, 2 ou 3 morceaux.

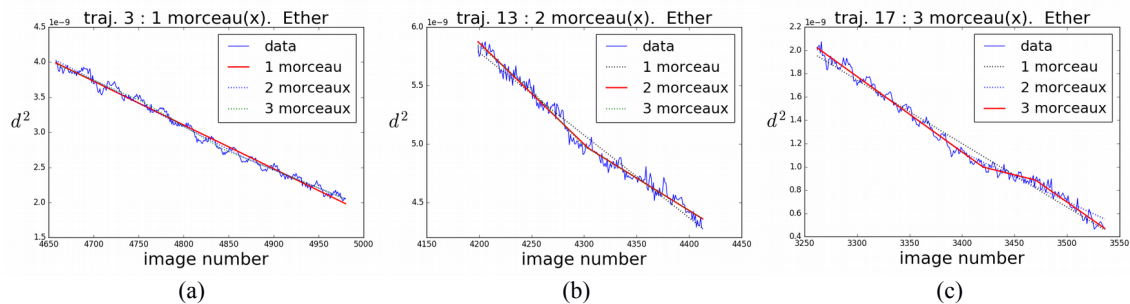


Figure 2 : Illustration montrant les 3 catégories de courbes d'évaporation observées, linéaire (a), linéaire en deux morceaux (b) et linéaire en 3 morceaux (c).

Le premier résultat important est une confirmation : la proportion de gouttelettes dont la courbe d'évaporation n'est pas linéaire et qui montre des changements de pente brutaux est loin d'être négligeable. Les proportions de courbe en 1, 2 et 3 morceaux sont respectivement de 37.3 % , 38.2 % et 24.5 %. Il existe différentes manières de déduire un taux d'évaporation moyen de ces résultats La plus simple est de réaliser une régression linéaire simple (en 1 seul morceau) pour chaque trajectoire. On obtient ainsi un taux moyen de $-3.73 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ avec une déviation standard de $4.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Si on calcule cette moyenne sur le sous-ensemble des courbes en un seul morceau on obtient un résultat très proche ($-3.71 \cdot 10^{-8} \pm 4.5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$). Cela montre que les changements de pente observés ne modifient pas de manière significative la statistique des taux moyens d'évaporation ce que confirment les distributions de taux d'évaporation sur l'ensemble des trajectoires et sur le sous-ensemble des courbes linéaires (en 1 morceau) figure 3a. Une autre manière de calculer un taux moyen d'évaporation est de pondérer les taux à moyenner par la durée de la trajectoire (pour les courbes en 1 morceau) ou par la durée de chaque partie linéaire (pour les courbes en plusieurs morceaux). Les distributions de taux d'évaporation obtenus avec cette pondération sont

présentés figure 3b. Les taux d'évaporation moyens et les écart types sont ici aussi très proches pour les courbes en 1, 2 ou 3 morceaux, avec des moyennes de $-3.72 \cdot 10^{-8}$, $-3.78 \cdot 10^{-8}$ et $-3.71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ et des déviations standards de $4.1 \cdot 10^{-9}$, $4.1 \cdot 10^{-9}$ et $6.75 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement.

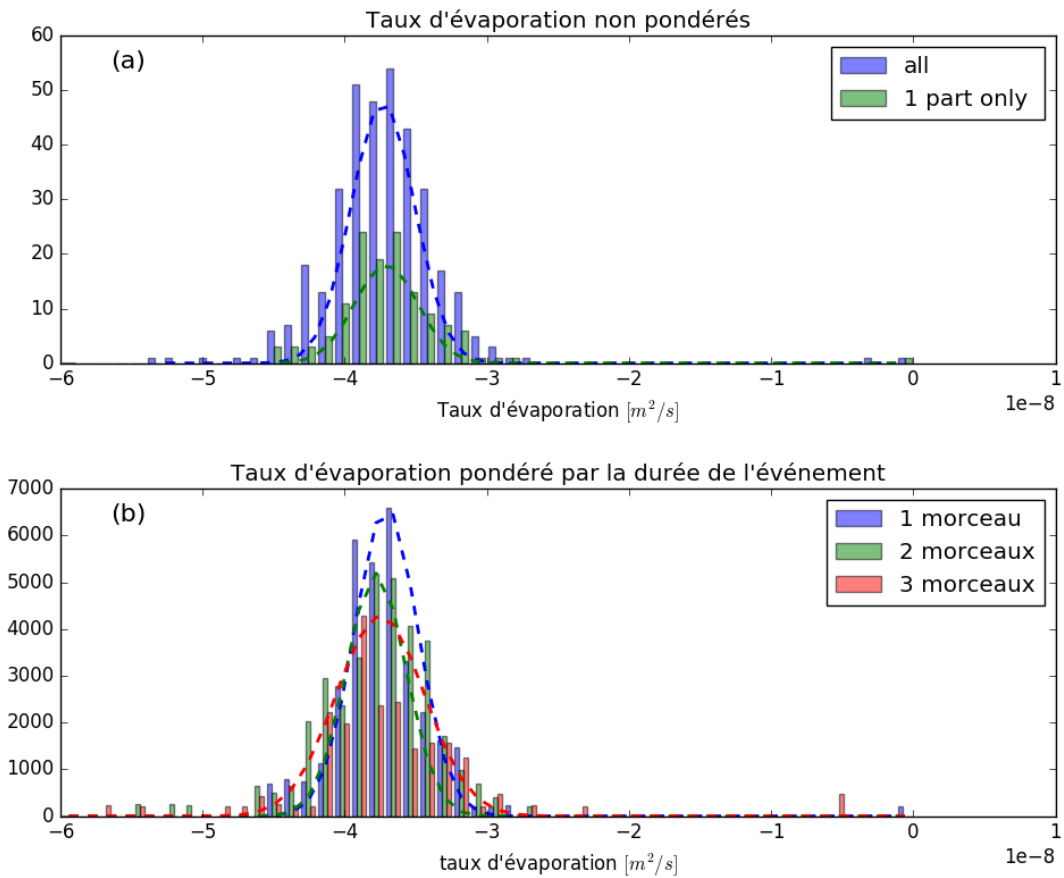


Figure 3 : Distribution des taux d'évaporation, sans pondération pour l'ensemble des trajectoires et pour celles dont la courbe d'évaporation est en 1 seul morceau (a), avec pondération par la durée de la trajectoire ou de chaque morceau (b). Les courbes en pointillés représentent des fonctions gaussiennes de même moyenne et de même écart type que les distributions.

Il est important de noter ici que les trajectoires de gouttelettes détectées ne révèlent qu'une partie de l'évaporation. La durée moyenne des trajectoires capturées est de 42 ms quand l'évaporation complète d'une gouttelette de 100 μm dans les conditions de l'expérience demande un temps de l'ordre de 250 ms. Autrement dit, nous n'avons en moyenne accès qu'à 15 ou 20 % de l'évaporation de la goutte et rien ne permet donc d'affirmer que les gouttes dont le taux d'évaporation est constant pendant la durée d'observation (courbes d'évaporation en un seul morceau) n'ont pas subi ou ne subiront pas de variations de ce taux avant ou après leur passage dans le volume de mesure.

Les distributions présentées figure 3b semblent indiquer que les taux d'évaporation mesurés ne sont pas d'avantage dispersés que l'on considère les gouttes pour lesquelles un changement de pente est observé ou non.

VI. Conclusions

L'étude expérimentale proposée consiste à suivre d'un point de vue Lagrangien des gouttelettes d'éther en évaporation dans une turbulence maîtrisée. Le suivi est réalisé grâce à montage d'holographie numérique en ligne et à une reconstruction par une approche

«problème inverse». L'expérience et les algorithmes développés à cet effet ont permis d'observer des comportements singuliers de gouttelettes [5] dont la courbe d'évaporation montrent un écart significatif avec la loi en « d^2 » et avec les prédictions d'un modèle simple. La confirmation de ces comportements et leur interprétation sont cependant limitées par le faible nombre d'observations, lui-même limité par les temps de traitement et la grande quantité de données à traiter. Le passage à l'échelle du traitement des hologrammes est réalisé sur un ordinateur parallèle avec un traitement automatisé des hologrammes en deux étapes selon un schéma détection rapide / mesure ciblée précise. Ces nouveaux outils permettent d'obtenir des résultats statistiques sur plusieurs centaines de trajectoires et ouvrent de nouvelles perspectives dans l'exploitation du dispositif expérimental et l'interprétation des résultats. Ils montrent d'abord que les changements de pentes précédemment observés sur les courbes d'évaporation de quelques gouttes ne sont pas rares et sont observés dans 60% des trajectoires isolées par le traitement. Ils permettent également d'établir des distributions de taux d'évaporation qui ne semblent pas dépendre du nombre de changements de pente observés ou non dans la courbe d'évaporation.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. Bien que les trajectoires de gouttes observées ne représentent en moyenne que 15 à 20% de la durée de vie de la goutte (de l'injecteur à la fin de l'évaporation), nous disposons de données statistiques sur les taux d'évaporation et la durée des événements qu'il semble possible de corrélérer et de combiner avec les éléments de dynamique dont nous disposons au travers des trajectoires. Une prochaine étape pourrait être par exemple d'automatiser la reconstruction de la dynamique de la goutte et de la vitesse relative du fluide ambiant [4-5], pour valider ou invalider l'hypothèse selon laquelle ces changements brusques du taux d'évaporation seraient liés à des changements brusques de la vitesse relative. Il semble également possible d'envisager à court terme de faire varier les paramètres de l'expérience et notamment ceux de la turbulence pour quantifier leur impact sur la durée moyenne de l'évaporation ou sur l'occurrence des changements de pente. Enfin, si les études menées jusqu'à présent ne s'intéressent qu'aux comportements individuels des gouttes, la perspective de pouvoir étudier des comportements collectifs de type accumulations ou effets de sillages redevient réaliste.

Remerciements

Ce travail a été en partie soutenu par le programme AMO-COPS (ANR-13-BS09-0008-02).

Références

- [1] Chareyron D, Marié JL, Fournier C, Gire J, Grosjean N, Denis L, Lance M, Méès L (2012) Testing an in-line digital holography “inverse method” for the Lagrangian tracking of evaporating droplets in homogeneous nearly-isotropic turbulence. *New J Phys* 14:043039
- [2] Soulez F, Denis L, Fournier C, Thiébaud E, Goepfert C (2007a) Inverse-problem approach for particle digital holography: accurate location based on local optimization. *J Opt Soc Am A* 24(4):1164–1171.
- [3] Seifi M, Fournier C, Grosjean N, Méès L, Marié JL, Denis L (2013) Accurate 3D tracking and size measurement of evaporating droplets using in-line digital holography and “inverse problems” reconstruction approach. *Opt Express* 21(23):27964–27980. doi:10.1364/OE.21.027964
- [4] Marié JL, Grosjean N, Méès L, Seifi M, Fournier C, Barbier B, Lance M (2014) Lagrangian measurements of the fast evaporation of falling diethyl ether droplets using in-line digital holography and a high speed camera. *Exp Fluid* 55(4):1708. doi:10.1007/s00348-014-1708-6
- [5] Marié JL, Tronchin T, Grosjean N, Méès L, Öztürk OC, Fournier C, Barbier B, Lance M (2017) Digital holographic measurement of the Lagrangian evaporation rate of droplets dispersing in a homogeneous isotropic turbulence *Exp Fluids* (2017) 58:11, DOI 10.1007/s00348-016-2292-8.