HAL
open science

# Comparaison de l'holographie numérique et de la strioscopie interférentielle utilisées pour la reconstruction des champs 3D de jets d'air et d'hélium

François Olchewsky, Zacaria Essaïdi, Jean-Michel Desse, Francois Nicolas, Frédéric Champagnat, Pascal Picart

**To cite this version:**

François Olchewsky, Zacaria Essaïdi, Jean-Michel Desse, Francois Nicolas, Frédéric Champagnat, et al.. Comparaison de l'holographie numérique et de la strioscopie interférentielle utilisées pour la reconstruction des champs 3D de jets d'air et d'hélium. CFM 2017 - 23ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2017, Lille, France. hal-03465570

**HAL Id: hal-03465570**

**https://hal.science/hal-03465570v1**

Submitted on 3 Dec 2021

**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.

# Comparaison de l'holographie numérique et de la strioscopie interférentielle utilisées pour la reconstruction des champs 3D de jets d'air et d'hélium

**François Olchewsky[a*], Zacaria Essaïdi[a], Jean-Michel Desse[a], François Nicolas[b], Frédéric Champagnat[c], Pascal Picart[d]**

[a] : ONERA-DAAA, 5 boulevard Paul Painlevé, BP 21261, 59014 Lille
[b] : ONERA-DSMA, CS 70100, 73500 MODANE
[c] : ONERA-DTIS, Chemin de la Hunière 91761 Palaiseau
[d] : LAUM, rue Aristote 72085 Le Mans
[*] francois.olchewsky@onera.fr

## Résumé :

*Ce papier présente des reconstructions d'un jet tridimensionnel d'hélium stationnaire par tomographies multidirectionnelles utilisant l'holographie numérique et la strioscopie interférentielle. Les projections sont obtenues par des interféromètres de Mach-Zehnder en holographie hors axe et des interféromètres différentiels à prisme de Wollaston. La reconstruction de la masse volumique à partir des projections est basée sur la résolution d'un problème inverse par minimisation d'un critère des moindres carrés associé à une régularisation de Tikhonov.*

## Abstract :

*In this article, 3D steady helium jet are reconstructed by multidirectional digital holographic and differential schlieren technique tomographies. Projections are obtained by off axis Mach-Zehnder interferometer and Wollaston prism white light differential interferometer. Gas density reconstruction using projections is based on a least square inverse problem with Tikhonov regularization.*

**Mots clefs : Holographie numérique, Strioscopie, Reconstruction 3D**

## 1 Introduction

Les modèles analytiques et les simulations numériques de calcul des écoulements (CFD) utilisés de nos jours nécessitent des mesures spatiales et temporelles fines pour initialiser les codes et valider leurs résultats. Les techniques de mesure optique utilisées ici sont à la fois globales et non-intrusives. Elles permettent de mesurer l'indice de réfraction et donc la masse volumique de l'écoulement (équation (4)). Au contraire de l'ombroscopie et de la strioscopie classique qui restent des méthodes qualitatives, l'holographie numérique [1], la Background Oriented Schlieren [2,3] et l'interférométrie différentielle à prisme de Wollaston sont des méthodes quantitatives.

L'holographie numérique permet de mesurer la phase et l'amplitude d'un objet. La grandeur recherchée ici est la différence de phase $\Delta\varphi$ entre une phase avec écoulement et une phase sans écoulement. Cette dernière est reliée à la différence de chemin optique $\Delta E$ par l'équation (1) où $\lambda$ est la longueur d'onde.

$$\Delta E = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi} \tag{1}$$

La BOS et l'interférométrie différentielle à prisme de Wollaston donnent accès à la déviation lumineuse $\theta$. Celle-ci est la dérivée de la différence de chemin optique comme montré dans l'équation (2).

$$\theta(x) = \frac{\partial \Delta E}{\partial x} \tag{2}$$

Ce chemin optique $E$ est une projection de l'indice de réfraction $n$ du milieu comme montré dans l'équation (3) où $L$ est la distance traversée par le rayon.

$$E = \int_0^L n(l)dl \tag{3}$$

Ainsi, en réalisant plusieurs projections suivant des lignes de visée différentes, il est possible de reconstruire un volume d'indice de réfraction du milieu par des techniques d'inversion tomographiques.

Enfin, grâce à la relation de Gladstone-Dale (équation (4)), l'indice de réfraction $n$ est relié à la masse volumique $\rho$ avec $K$ la constante de Gladstone-Dale.

$$n - 1 = K\rho \tag{4}$$

Dans cet article, les projections 2D et les reconstructions de masse volumique 3D obtenues par holographie numérique et strioscopie interférentielle sont comparées.

# 2 Montages optiques

## 2.1 Strioscopie interférentielle

Le montage optique est composé de deux parties distinctes.

La partie entourée en vert est un montage de strioscopie interférentielle à simple traversée. L'onde de mesure est séparée en deux faisceaux légèrement espacés au niveau d'un prisme de Wollaston. Ces deux faisceaux traversent l'écoulement parallèlement grâce à la lentille de 800mm de focale. Ces deux faisceaux sont renvoyés sur un deuxième prisme de Wollaston qui recombine les deux faisceaux. Des interférences en lumière blanche sont ainsi obtenues au niveau d'une caméra. Cette partie fait des projections suivant différents axes de visée lorsque l'on fait tourner la buse sur son axe de rotation.

La partie entourée en rouge est aussi un strioscope interférentiel à double traversée. C'est un montage qui permet de mesurer des différences de chemin optique entre les deux faisceaux séparés par le prisme à l'aller, qui traversent l'écoulement par des trajets différents puis qui sont recombinés par le prisme et interfèrent. Cette partie tourne en même temps que la buse, elle voit donc toujours la même projection ce qui permet de contrôler que le jet observé est bien toujours stationnaire et identique pour toutes les lignes de visée.

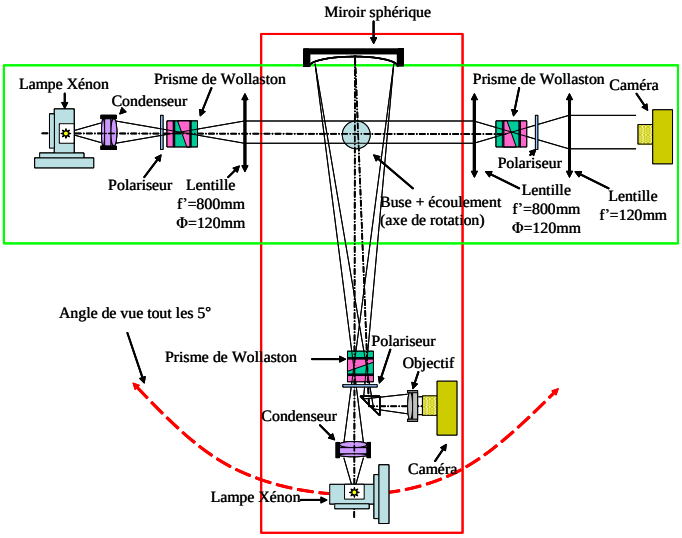


**Figure 1** : Schéma du montage optique

## 2.2 Holographie numérique

La partie entourée en vert est un montage Mach-Zehnder. L'onde de mesure traverse le jet en faisceaux parallèles grâce à un filtre spatial placé au foyer d'une lentille de 800mm de distance focale. Un système afocal composé de lentilles de distances focales 800mm et 200mm pour le jet d'hélium permet de faire la mise au point de cette onde sur un capteur. Cette onde interfère avec une autre qui n'est pas passée à travers le jet. Cette partie fait des projections suivant différents axes de visée lorsque l'on fait tourner la buse sur son axe de rotation.

La partie entourée en rouge est la même que celle du montage de strioscopie.

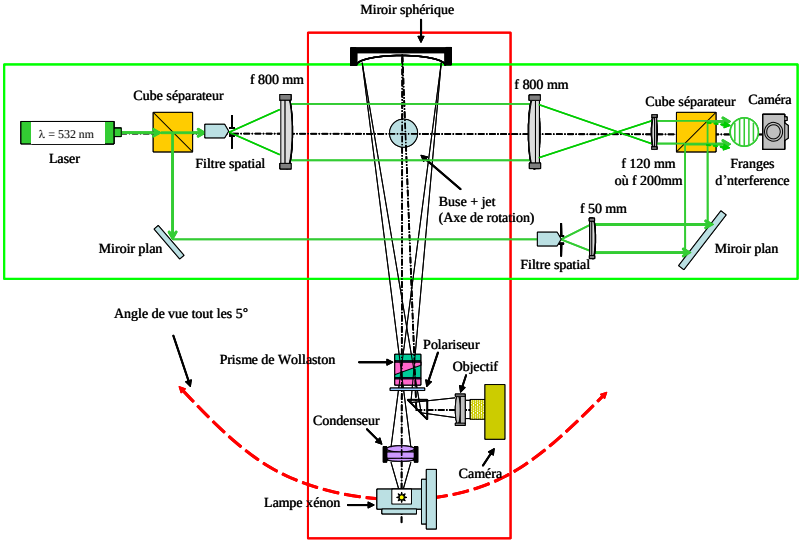


**Figure 2** : Schéma du montage optique

# 3 Jets étudiés

Les jets étudiés sont des jets d'hélium laminaires provenant d'une buse en forme d'étoile (Figure 3).

**Figure 3** : Schéma de la buse en forme d'étoile

# 4 Projections

Les interférogrammes obtenus par le montage avec prisme de Wollaston donnent des interférences en teinte blanche. La modélisation des couleurs permet de retrouver la différence de chemin optique entre les deux rayons qui sont passés dans l'écoulement par des chemins différents. Ces différences sont approximées à des gradients (Figure 4). Ces gradients sont ensuite intégrés pour donner le chemin optique de l'écoulement (Figure 5).

Les interférogrammes obtenus en holographie numérique sont dépouillés en ne gardant que l'ordre +1 dans le spectre de Fourier. Ensuite, une phase modulo 2π est extraite. En soustrayant deux cartes de phase (une avec écoulement et l'autre sans), la carte de phase modulo 2π résultante est celle de l'écoulement. Cette phase est finalement dépliée puis, grâce à l'équation 1, transformée en chemin optique (Figure 6).

Les chemins optiques obtenus par les deux méthodes ont la même plage de mesure.

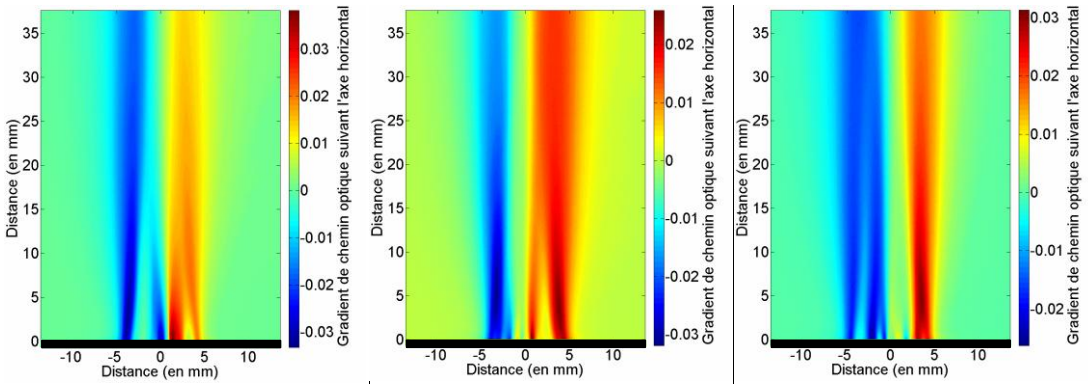


**Figure 4 :** Gradients de chemins optiques obtenus par strioscopie différentielle pour des lignes de visée à 0°, 45° et 90°

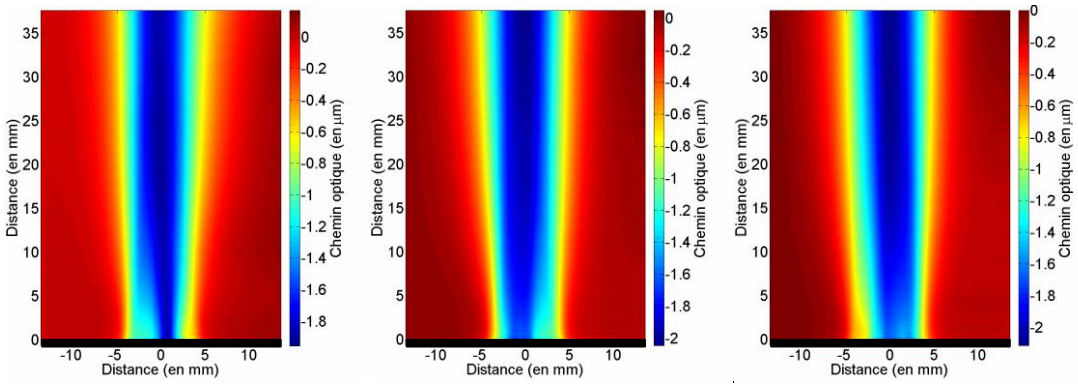


**Figure 5 :** Chemins optiques obtenus par intégration des gradients de la figure 4 pour des lignes de visée à 0°, 45° et 90°

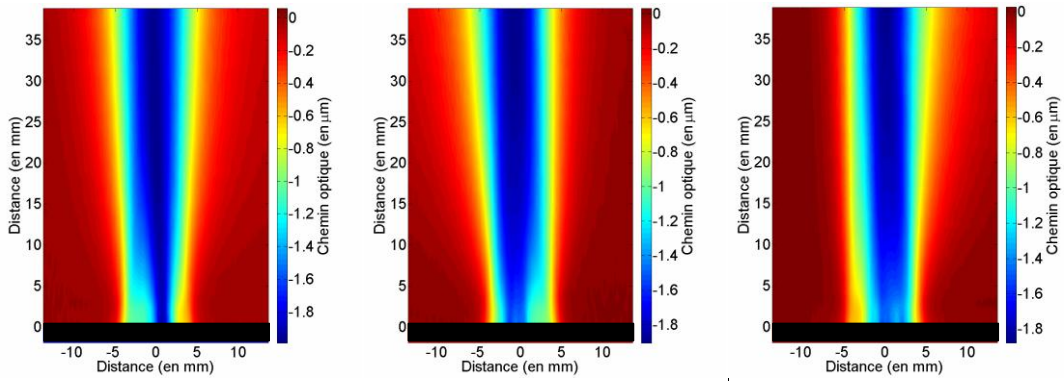


**Figure 6 :** Chemins optiques obtenus par holographie numérique pour des lignes de visée à 0°, 45° et 90°

# 5 Reconstructions

La reconstruction de la masse volumique à partir des projections est fondée sur une approche, classique en problèmes inverses, de régularisation de Tikhonov [4] dans laquelle la fidélité aux données de projection est pondérée par un terme de régularisation qui pénalise la norme du gradient de masse volumique de manière similaire à [5]. Comme les projections ont été réalisées avec des faisceaux parallèles, il est possible de reconstruire le volume par plans. Ainsi, comme tous les plans sont reconstruits indépendamment les uns des autres, la parallélisation permet de reconstruire le volume avec un gain de temps.

Les reconstructions présentées ont été réalisées en prenant des projections tout les 5° sur l'intervalle [0°,180°], soit 36 lignes de visée différentes.

Les reconstructions figure 7 montrent qu'en sortie de buse, la forme d'étoile est bien reconstruite puis que l'hélium diffuse rapidement dans l'air et que la forme disparaît. Les masses volumiques normalisées par rapport à l'air extérieur sont similaires et la diffusion de l'hélium a la même allure dans les deux cas.

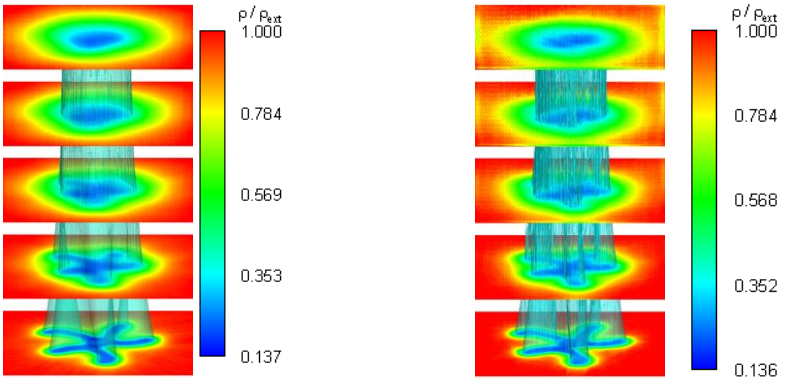


**Figure 7:** Masse volumique du jet d'hélium reconstruit par strioscopie interférentielle (à gauche) et par holographie numérique (à droite)

Les reconstructions figure 8 montrent des jets d'air supersoniques en sortie de la même buse en forme d'étoile. Les ondes de choc et de décompression sont similaires dans les deux cas.

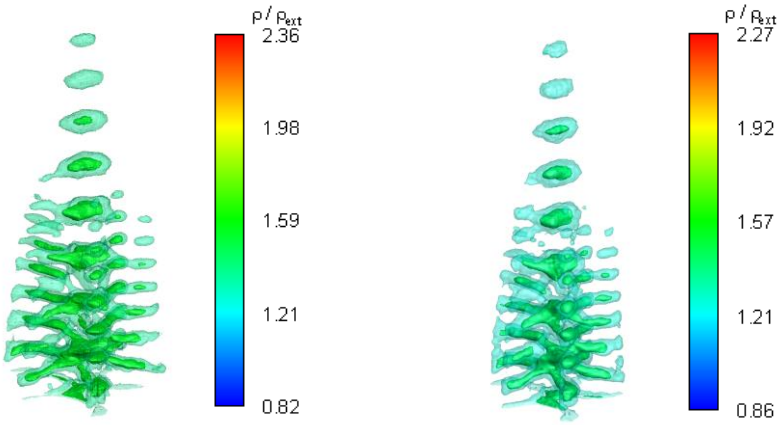


**Figure 8:** Iso-surfaces de la masse volumique du jet d'air reconstruit par strioscopie interférentielle (à gauche) et par holographie numérique (à droite)

# Conclusion

Les deux techniques donnent des résultats de projection ainsi que de reconstruction 3D comparables. Dans cet exemple, la strioscopie différentielle semble mieux résolue que l'holographie numérique. Cependant, l'holographie a une plage de mesure bien supérieure à la strioscopie, notamment au niveau des ondes de choc, ce qui semblerait mieux adapté à des mesures en mécanique des fluides.

# Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale pour la Recherche qui a contribué au financement de cette étude par l'intermédiaire du contrat n° ANR-14-ASTR-005-01.

# Références

[1] J.M. Desse, P. Picart & P. Tankam (2009) *Digital three-color holographic interferometry for flows analysis.* **Optics Express**, Vol. 16, n° 8, 5471- 5480.

[2] V. Todoroff (2013) *Mesure d'un champ de masse volumique par Background Oriented Schlieren 3D. Etude d'un dispositif expérimental et des méthodes de traitement pour la résolution du problème inverse.* **Thèse de doctorat** de l'université de Toulouse.

[3] F. Sourgen, F. Leopold & D. Klatt (2012) *Reconstruction of the density field using the Colored Background Oriented Schlieren Technique (CBOS),* **Optics and Lasers in Engineering** 50, 1, 29-38.

[4] Tikhonov A. & Arsenin V., Solutions of ill-posed problems. Winston (1977).

[5] Nicolas F., Todoroff V., Plyer, A. et al. (2016) *A direct approach for instantaneous 3D density field reconstruction from background-oriented schlieren (BOS) measurements,* **Exp. Fluids** 57: 13.