



HAL
open science

Application de la BOS 3D aux écoulements compressibles

François Nicolas, Francis Micheli, David Donjat, Aurélien Plyer, Frédéric Champagnat, Guy Le Besnerais

► **To cite this version:**

François Nicolas, Francis Micheli, David Donjat, Aurélien Plyer, Frédéric Champagnat, et al.. Application de la BOS 3D aux écoulements compressibles. CFTL 2016, Sep 2016, TOULOUSE, France. hal-01396660

HAL Id: hal-01396660

<https://hal.science/hal-01396660>

Submitted on 14 Nov 2016

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.

Application de la BOS 3D aux écoulements compressibles.

François Nicolas^{1,*}, Francis Micheli¹, David Donjat¹, Aurélien Plyer², Frédéric Champagnat²,
Guy Le Besnerais²

1: ONERA/DMAE, Toulouse, France

2: ONERA/DTIM, Palaiseau, France

* Auteur correspondant : francois.nicolas@onera.fr

Nous avons récemment proposé une approche directe de BOS 3D pour la reconstruction de champs instantanés de masses volumique à partir d'un nombre limité de points de vue [7]. A travers ce papier, nous nous intéressons à l'application de notre méthode dans le contexte d'écoulements compressibles. Dans un premier temps, notre étude porte sur l'optimisation du montage expérimental de BOS 2D afin de limiter les effets d'un astigmatisme parasite lié aux forts gradients. Nous montrons alors qu'en choisissant correctement les paramètres expérimentaux, il est possible d'acquérir des images BOS de très bonne qualité. Dans un deuxième temps, nous mettons en œuvre la BOS 3D grâce à un banc d'essais supportant 12 caméras autour d'une configuration de jet sous-détendu. Les champs moyens de masse volumique sont reconstruits et présentent une topologie en bon accord avec une simulation numérique. Un champ instantané de masse volumique a également été reconstruit, illustrant tout le potentiel de la technique pour l'analyse physique des écoulements.

1 Introduction

La Background Oriented Schlieren est une technique optique qui permet de mesurer les gradients de masse volumique. Pour cela, on réalise l'image d'un fond texturé (mouchetis) en l'absence d'écoulement, puis en présence de l'écoulement entre la camera et le fond. Les variations d'indice optique au sein de l'écoulement induisent une déviation des rayons lumineux qui se traduit par un déplacement apparent du mouchetis. Ces déplacements peuvent ensuite être calculés par un algorithme de corrélation d'image, comme ceux utilisés en PIV. Dans une dernière étape, en connaissant la géométrie du montage expérimental, les cartes de déviation sont déduites des champs de déplacement.

A partir de l'enregistrement des différentes cartes de déviations depuis plusieurs points de vue, le champ tridimensionnel de masse volumique peut être reconstruit [2] [6] [8]. L'approche directe que nous avons récemment proposée [7] s'inscrit dans la suite de la méthode présentée par Atcheson [2]. Notre technique repose sur l'acquisition simultanée de l'écoulement au moyen d'une douzaine de caméras. Dans [7], de bons résultats ont été obtenus sur un écoulement aérothermique présentant de faibles gradients de masse volumique. Dans ce cas, l'approximation paraxiale faite sur la trajectoire des rayons lumineux reste valide. De plus, pour ce type d'écoulement incompressible, le champ 3D de température peut être déduit du champ de masse volumique, ce qui nous a permis de valider notre reconstruction avec des mesures par thermocouples [3].

Alors que la striescopie a largement été utilisée pour l'étude des écoulements transsoniques et supersoniques, offrant de belles visualisations des ondes de chocs, l'extension de la BOS 3D à ce type de phénomènes n'est pas immédiate. En effet, deux difficultés majeures sont rencontrées.

- La première est liée au flou généré par les forts gradients de masse volumique sur les images BOS. Celui-ci dégrade fortement les images et altère directement l'estimation des champs de déplacement lors de la corrélation. Dans [6], Leopold propose d'utiliser un mouchetis coloré et d'effectuer des corrélations entre les couleurs afin de remonter à l'information au niveau des ondes de choc. Dans ce travail, nous nous reposons sur des images classiques en niveaux de gris mais nous montrons qu'en choisissant de manière pertinente les caractéristiques de notre montage, il est possible d'obtenir des champs de déplacement avec une bonne résolution, comparables à la striescopie.
- La seconde difficulté est liée à l'approximation paraxiale elle-même : celle-ci n'est plus valide à la traversée des ondes de chocs. Notre but ici est de mesurer la capacité de notre algorithme BOS 3D présenté dans [7] à fonctionner en présence de forts gradients.

2 Étude des effets compressibles sur des images BOS

Les ondes de choc et plus généralement les forts gradients de masse volumique, occasionnent de fortes déviations sur les rayons lumineux. L'astigmatisme qui en résulte est responsable d'un flou parasite comme l'illustre la Figure 1.

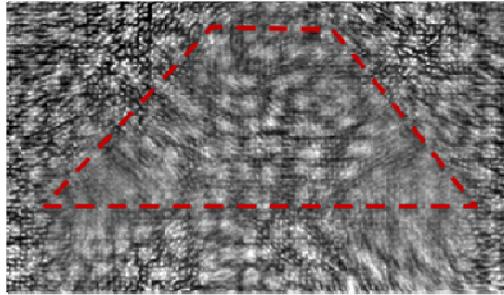


Figure 1 : Astigmatisme parasite présent au niveau d'une cellule de choc d'un jet sous-détendu.

Ce flou peut s'avérer très dommageable pour le calcul des champs de déplacement par corrélation d'images : le score de corrélation diminue et dans certains cas, lorsque le flou est trop important, la corrélation est mise en échec. De plus, l'absence de valeur de déviations dans certaines zones du champ dégrade fortement la qualité de la reconstruction 3D du champ de masse volumique.

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'influence des paramètres expérimentaux sur la sensibilité et la qualité des champs de déplacements. Cette optimisation, et notamment la minimisation du flou d'astigmatisme, est conduite sur l'étude d'un jet sous-détendu.

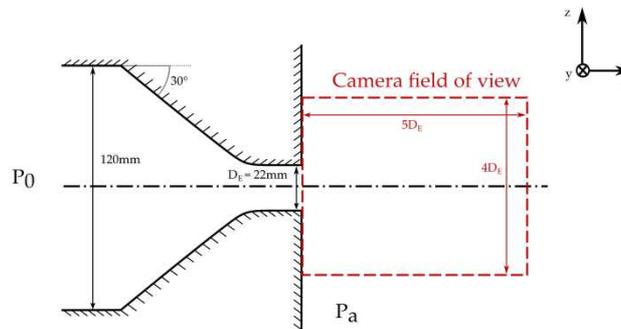


Figure 2 : Vue schématique de la tuyère convergente générant le jet-sous-détendu.

Notre installation est composée d'une buse convergente de 22mm de diamètre alimentée par un réservoir d'air pressurisé (Figure 2). Plusieurs rapports de pression ou NPR (égal au rapport de la pression total du jet sur la pression ambiante) compris entre 2 et 5 sont étudiés. L'air est régulé en température et maintenu à 20°C par un réchauffeur de 570kW afin d'éviter tout phénomène de condensation. La buse a été dessinée afin d'obtenir un plan sonique à l'ajutage. Le système d'acquisition BOS se compose d'une caméra JAI BM-500GE équipée d'un objectif de 70 mm. Elle est placée à une distance $Z_c = 1$ m de la buse tandis que le fond moucheté est positionné à une distance Z_b de l'écoulement comprise entre 0.18 m et 2.9 m (voir Figure 3). Pour chaque position ($Z_b = 0.18$ m, 0.4m, 1.3m, 2.9m), le mouchetis a été conçu de telle sorte que les points qui le composent forment une image de 3 à 4 pixels sur le CCD de la caméra. L'éclairage est réalisé au moyen d'un laser double flash Quantel Twins BSL. Les deux flashes laser sont utilisés durant le temps d'exposition caméra afin d'accroître la quantité de lumière. La durée d'exposition effective est donc le temps inter-flash, soit 100 ns.

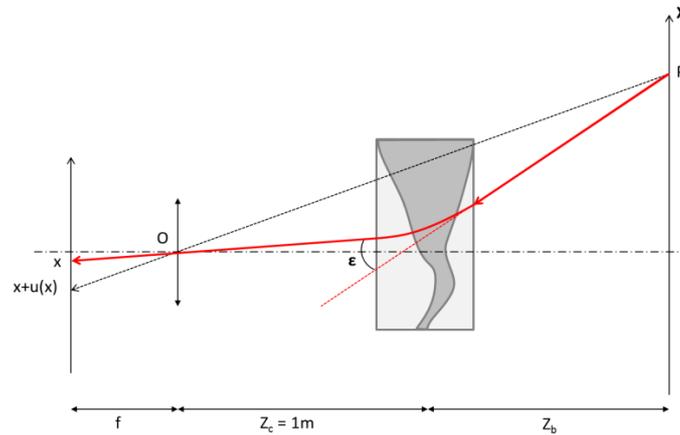


Figure 3 : BOS principe.

Notre étude se focalise sur deux paramètres principaux:

- la distance du mouchetis vis à vis de l'écoulement Z_b
- l'influence de l'ouverture camera $f_{\#}$

Comme l'illustre le schéma de la figure 3, le déplacement (en pixel) mesuré par la caméra est proportionnel à la distance entre le fond moucheté et l'écoulement étudié. En rapprochant le fond moucheté de l'écoulement, les effets optiques induits par les gradients de masse volumique sont atténués ce qui réduit par conséquent les flous. Malheureusement, si une réduction de la distance Z_b favorise la capture des ondes de choc, elle conduit à une perte importante de la sensibilité de la méthode avec un risque de limiter la mesure des plus petits gradients. Nous avons donc testé différentes positions du fond et conduit une évaluation de l'estimation des déviations optiques dans chaque cas. A partir des 4 cas testés ($Z_b = 2.9, 1.4, 0.4$ et 0.18 m), la position $Z_b = 0.4$ m offre la meilleure dynamique permettant à la fois une détection des plus petites variations telles que des ondes acoustiques et la capture des plus gros gradients associés aux ondes de choc.

Afin d'évaluer l'influence de l'ouverture de la caméra, différents réglages du diaphragme (7.1, 8, 11, 16 et 22) sont testés, l'intensité du laser étant ajustée afin de conserver un niveau d'éclairage satisfaisant dans chaque cas. Il apparaît alors que lorsque l'on diminue l'ouverture, les effets d'astigmatisme diminuent puisque les rayons lumineux les plus déviés sont filtrés comme l'illustre la Figure 4. L'influence de l'ouverture a ainsi un impact sur la qualité des corrélations mais aussi permet de révéler des détails de l'écoulement masqués par les effets de flou. Ainsi le réglage à $f_{\#} = 16$ représente le meilleur compromis. Pour des réglages plus importants les effets de diffraction se manifestent, augmentant ainsi le bruit de corrélation sur les images de déplacement de BOS.

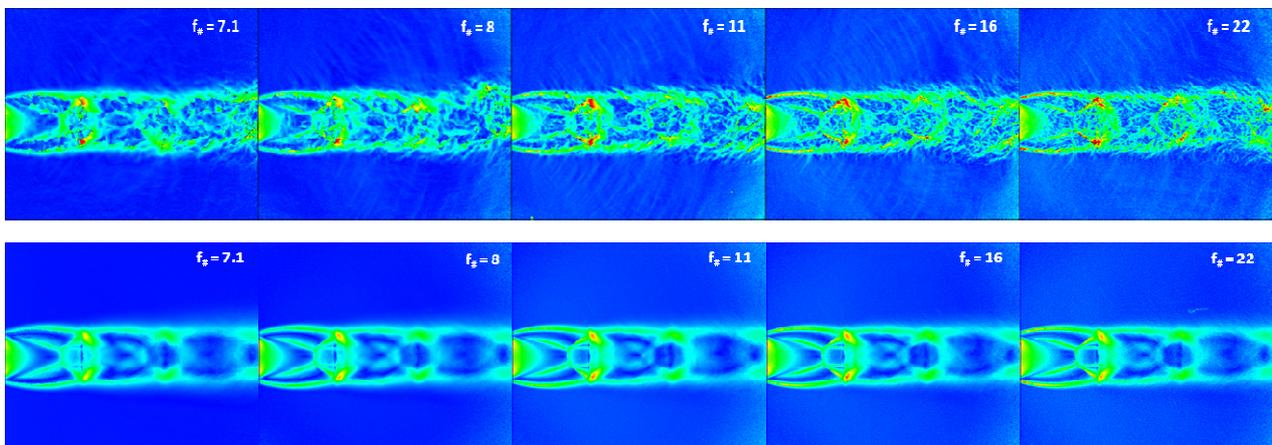


Figure 4 : Influence de l'ouverture caméra sur les champs instantanés pris par BOS (en haut) et sur le champ moyen (en bas). Norme du déplacement en pixels (échelle comprise entre 0 et 10).

En conclusion, un choix optimal des conditions de prise de vue en technique BOS permet d'obtenir des images de très bonne qualité avec une résolution spatiale comparable à celle obtenue classiquement en strioscopie éclair. La figure 5 en offre un parfait exemple.

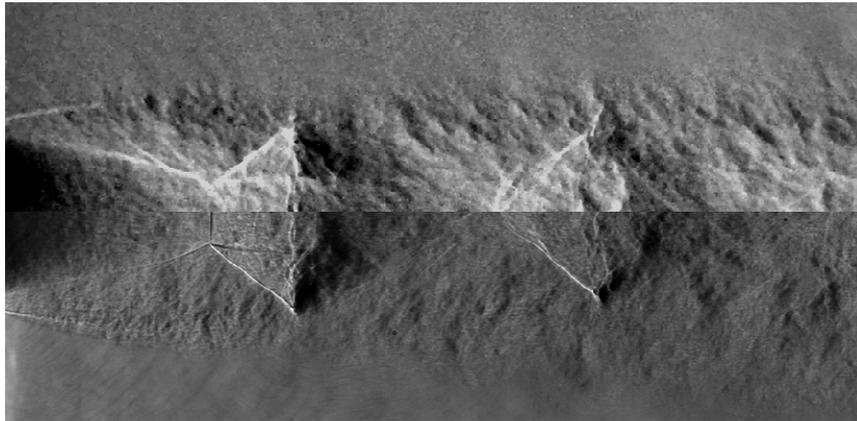


Figure 5 : Comparaison entre une image BOS (en haut) et une strioscopie (en bas) - NPR=5.

3 Acquisition par BOS 3D du champ de masse volumique pour un jet sous-détendu

La mise en place de l'expérience BOS 3D s'appuie sur les conclusions apportées par l'étude présentée dans la section précédente. Quatre fonds mouchetés constitués de points de 0,2 mm de diamètre sont disposés en demi-cercle à $Z_c=400$ mm du jet. Pour l'étude d'un jet, l'expérience montre qu'il faut placer les différentes caméras d'acquisition suivant un demi-cercle (voir [7] et [2]). Suivant cette idée, nos 12 caméras sont disposées sur un châssis hexagonal permettant une distance Z_b égale à 1000mm jusqu'au jet (voir la Figure 6). La gamme de pression étudiée est définie pour un NPR allant de 2 à 5.

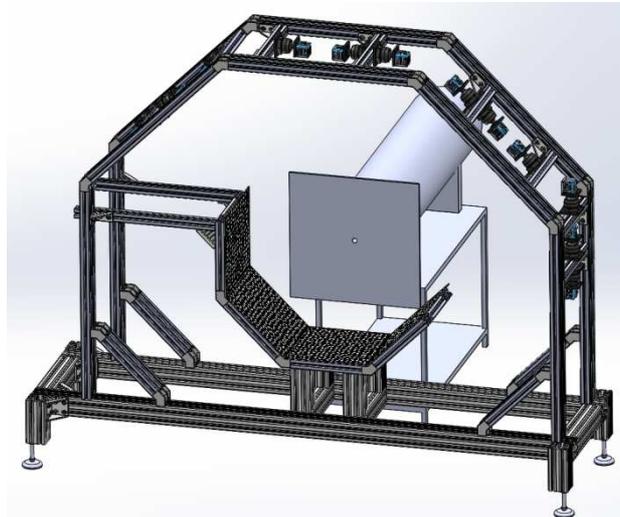


Figure 6 : banc expérimental BOS 3D placé autour du jet

Le laser YAG utilisé lors de l'expérience précédente est à nouveau utilisé comme source de lumière. Cependant afin d'éclairer l'ensemble de la surface du mouchetis, le faisceau principal est séparé en quatre faisceaux secondaires avant d'être projetés sur les fonds. Comme dans le cas précédent, les deux flashes laser sont utilisés au cours du temps d'exposition. Les 12 caméras ainsi que le laser sont synchronisés avec l'aide d'un générateur TTL. Malgré les moyens déployés, il n'est pas possible d'utiliser un réglage strictement comparable à celui préconisé par l'étude de sensibilité. L'ouverture maximale utilisée est réduite à 8. Ce compromis impose donc un filtrage des plus petites structures de l'écoulement. Néanmoins, cette limitation n'affectera que raisonnablement la qualité de la mesure (cf figure 4). Actuellement, différentes solutions sont à l'étude afin d'améliorer l'illumination des fonds dans le but d'une optimisation des réglages optiques. Ces

améliorations sont particulièrement attendues pour la reconstruction de champs instantanés pour des jets compressibles à haut NPR.

Pour la partie acquisition, les images sont transférées à la mémoire RAM du système via un répartiteur Enterasys puis sont écrites sur des disques SSD. Cette solution permet une acquisition synchronisée sur les 12 caméras à une fréquence de 10Hz.

Enfin, avant toute acquisition, le système de caméras est calibré suivant une procédure exposée dans [9] avec l'aide d'une plaque de calibration déplacée dans le volume commun observé par toutes les caméras.

4 Résultats

Dans cette section, nous présentons les reconstructions moyenne et instantanée obtenues pour un jet sous détendu à NPR modéré (NPR=2) ainsi qu'un exemple de reconstruction d'un champ moyen pour un jet à NPR élevé (NPR=5). Nous nous limitons ici à ce seul champ moyen parce que le cas NPR=5 se caractérise par d'importants gradients de masse volumique. Le montage actuel induit des effets d'astigmatisme trop importants qui limitent la qualité des reconstructions des champs instantanés. Le champ moyen montre une topologie d'écoulement bien marquée et apparaît beaucoup moins complexe qu'un champ instantané. De plus, le champ moyen peut être plus facilement comparé à des résultats de CFD, à des mesures strioscopiques ou à tout autre résultat antérieur.

Les reconstructions 3D d'un champ moyen sont déduites des champs de déplacement moyens obtenus pour chaque caméra à partir de 900 images. Le calcul de la reconstruction est réalisé sur un volume de $10 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ sur la base d'un maillage comprenant entre 40 et 100 millions de voxels de 0.2 mm de côté. Un masque 3D est utilisé dans chaque cas afin d'améliorer ces reconstructions. Comme décrit dans [7], la solution de ce problème inverse est défini comme étant la minimisation d'un système régularisé à l'aide d'une méthode de gradient conjugué. Le paramètre de régularisation λ est choisi suivant la stratégie de la courbe en L [5]. Par comparaison avec les cas traités dans [7], le paramètre optimal est beaucoup plus faible dans les cas présents ($\lambda=10^{-6}$ à comparer à $\lambda=10^{-4}$ dans [7]) limitant un lissage trop important des forts gradients de masse volumique.

Comme l'illustre la figure 7, le champ moyen du jet sous détendu le plus faible présente une structure de cellules de choc caractéristique pour ce type d'écoulement. Ces structures résultent de la réflexion successive d'ondes de détente et d'ondes de choc sur la ligne de glissement tout au long de la relaxation du jet dans l'air ambiant. Comme le résultat présenté est limité au volume commun de toutes les caméras, le début du jet n'est pas reconstruit. Les limites du masque 3D sont discernables sur la Figure 7 : ceci dénote un manque d'itérations au cours du processus de reconstruction qui auraient permis une atténuation de ces artéfacts grâce à la régularisation. Même si le code de reconstruction se comporte très bien dans ce cas, nous notons néanmoins quelques altérations au niveau des deux premières cellules de choc.

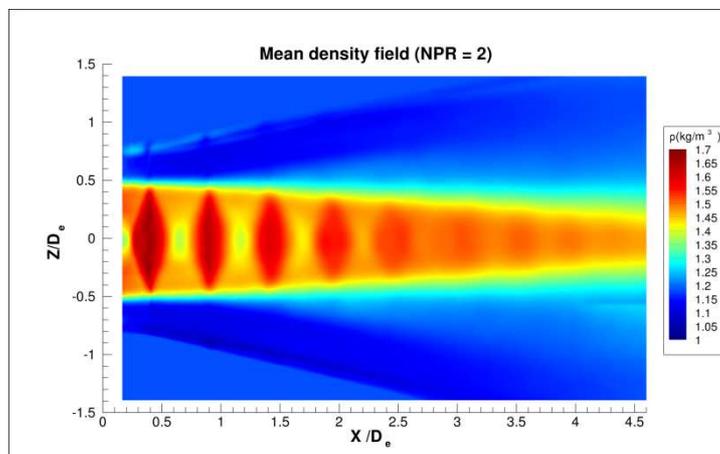


Figure 7 : Champ de masse volumique moyen pour un NPR=2. Plan $y=0$.

La reconstruction d'un champ instantané, présentée en Figure 8, montre une structure beaucoup plus complexe. Si les deux premières cellules apparaissent très stables (comparées au cas moyen), ce n'est plus le cas pour la partie aval de l'écoulement. En effet, la seconde partie du jet montre des cellules de choc particulièrement distordues. Un sur-lissage dû à la reconstruction affecte aussi la qualité du résultat ainsi que la capture des plus petites échelles.

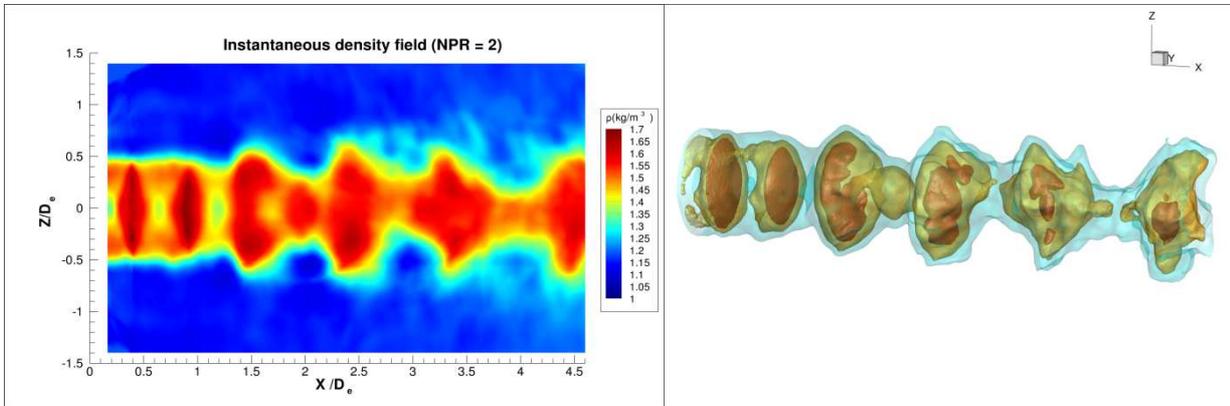


Figure 8 : Reconstruction d'un champ de masse volumique instantané pour un NPR=2. Plan $y=0$ à gauche et iso-densités à droite.

Une analyse plus fine des performances de notre algorithme passe par l'application de l'opérateur direct sur le champ reconstruit. Les champs de déviations ainsi constitués sont alors comparés aux données expérimentales. Comme l'illustre la Figure 9, l'accord entre ces données est très bon validant ainsi le processus de reconstruction pour ce cas.

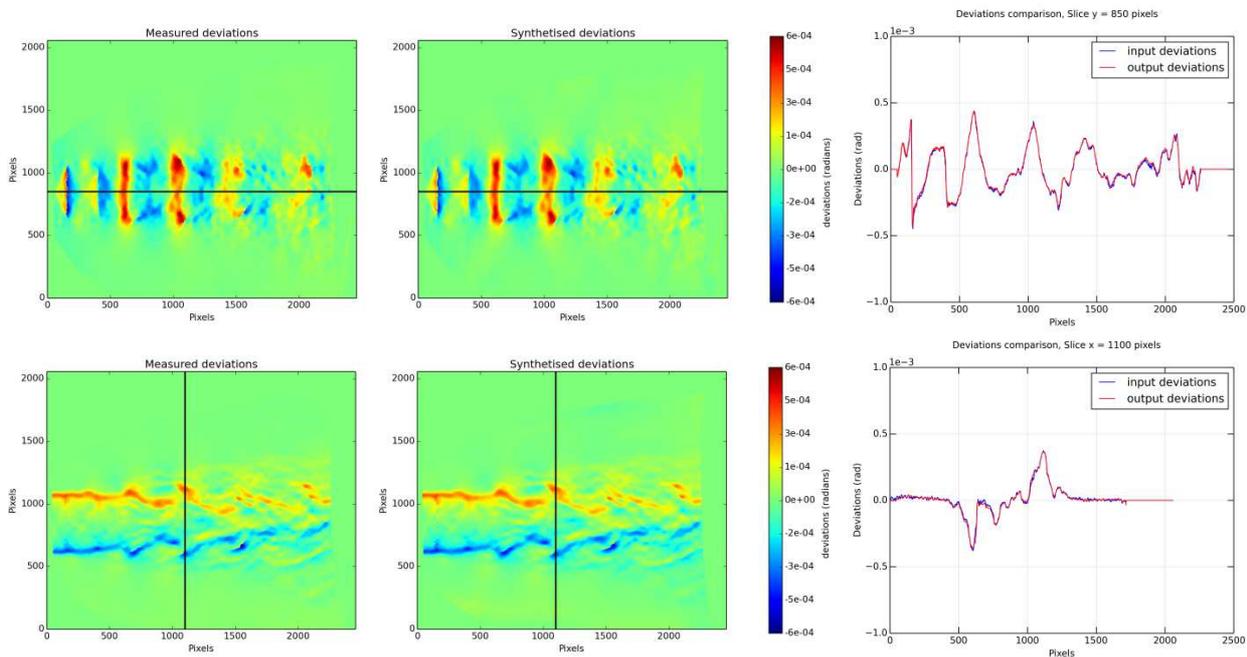


Figure 9: Comparaison entre cartographies de déviation pour l'angle ε_x en haut et ε_z en bas.

La reconstruction du jet sous détendu à NPR=5 est présentée en Figure 10 en partie haute. Le champ obtenu est comparé avec le résultat d'une simulation RANS effectué pour les mêmes conditions d'essai. Cette simulation est réalisée avec le logiciel FLUENT14. Avec l'augmentation du NPR, un choc droit appelé « disque de Mach » (ou DM) apparaît. Il est clairement visible pour les deux premières cellules du jet reconstruites. En aval de ces disques de Mach se constitue une zone subsonique avant une réaccélération de l'écoulement induisant une nouvelle apparition d'une cellule de Mach. La reconstruction 3D du champ de masse volumique montre un très bon accord avec le résultat de CFD. La topologie autant que les niveaux sont comparables. Néanmoins, les gradients les plus intenses apparaissent trop lissés dans le processus de reconstruction. Bien que

la position du disque de Mach semble différente entre les deux résultats de gauche sur la Figure 10, le champ de gradient présenté à droite de cette figure montre par contre un très bon accord. L'écart observé entre calcul et reconstruction au niveau de la seconde cellule est symptomatique des résultats RANS obtenus pour ce type de configuration.

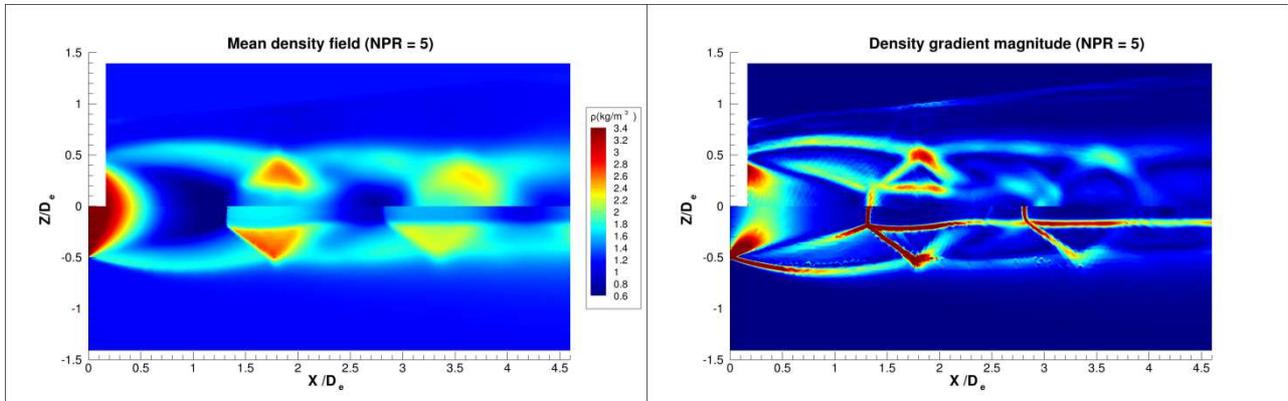


Figure 10 : Champ moyen de masse volumique pour un NPR=5 à gauche and champ des gradients de masse volumique à droite. Plan $y=0$. Reconstruction 3D en haut et calcul RANS en bas.

La Figure 11 donne une évolution de la position et du diamètre du premier disque de Mach donnée par [1], comparée aux résultats obtenus aux cours de précédentes campagnes de strioscopie sur le jet étudié dans cet article. Bien que la géométrie du disque de Mach soit altérée par la reconstruction, la position et le diamètre mesurés sont comparables aux résultats antérieurs. Enfin, nous notons aussi que la reconstruction proposée ici offre beaucoup plus de détails (en particulier au niveau de la zone subsonique en aval du disque de Mach) que les reconstructions basées sur l'inversion d'Abel (sur des données de Schlieren CT) proposée sur ce type d'écoulement par Takano [10].

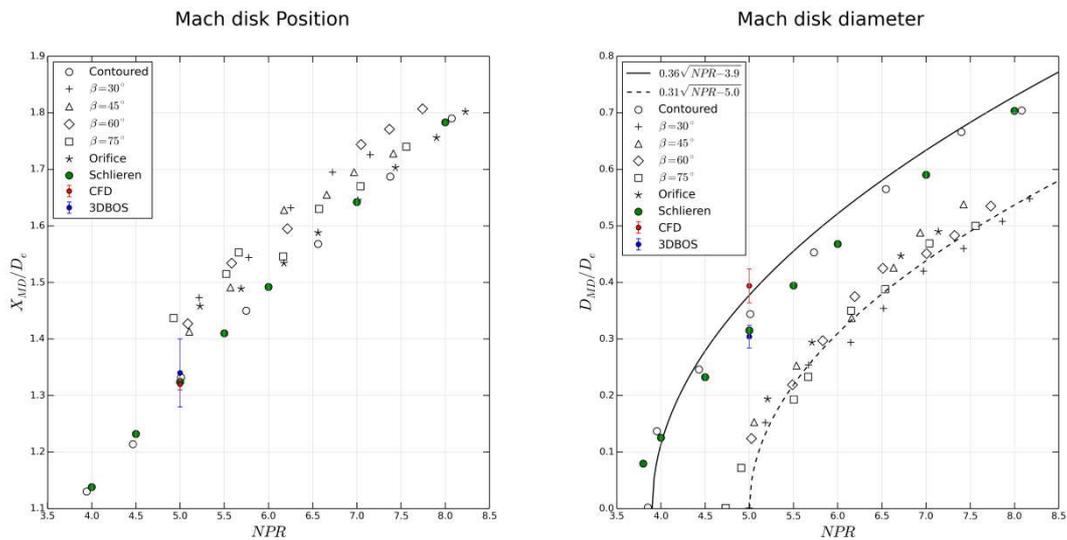


Figure 11 : Évolution de la position et du diamètre du disque de Mach en fonction du NPR (d'après [1]). Comparaison avec la simulation RANS, les données strioscopique et la mesure BOS 3D

5 Conclusion

Dans cet article, nous présentons plusieurs reconstructions 3D d'un jet compressible à partir de données BOS. Dans un premier temps, nous montrons qu'une optimisation du banc optique couplée avec une source d'éclairage suffisante afin de choisir une ouverture adaptée permet d'obtenir des images BOS de très bonne qualité comparable aux données fournies par la strioscopie. Ensuite, nous avons présenté plusieurs reconstructions 3D de champ de masse volumique pour un jet sous détendu. Les résultats obtenus sont particulièrement probants. L'écoulement estimé reste néanmoins sur lissé. Une amélioration certaine passera par une optimisation des images suivant les conclusions obtenues lors de l'étude préliminaire. De même, des travaux complémentaires sur la méthode de reconstruction devront permettre d'une part de limiter l'impact de l'hypothèse paraxiale et d'autre part d'adapter le terme de régularisation pour les gradients les plus intenses.

6 Bibliographie

- [1] Addy, A. L. (1981). Effects of axisymmetric sonic nozzle geometry on Mach disk characteristics. *AIAA Journal*, 19(1), 121-122.
- [2] B. Atcheson, W. Heidrich and I. and Ihrke, "An evaluation of optical flow algorithms for background oriented schlieren imaging.", *Experiments in fluids*, pp. vol. 46, no 3, p. 467-476., 2009.
- [3] D. Donjat, F. Nicolas, A. Plyer, F. Micheli, P. Cornic, G. Le Besnerais, F. Champagnat, Y. Le Sant, J.M. Deluc (2015) "Study of a co-flowing hot jet: an application of direct 3DBOS technique in research wind tunnel", 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP 2015), Naples.
- [4] G. Elsinga, B. Van Oudheusden and F. Scarano, "Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV.", *Experiments in fluids*, vol. 39, no. 2, pp. 246-256, 2005.
- [5] P. C. Hansen, «Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve.», *SIAM review*, vol. 34, n° 14, pp. 561-580, 1992.
- [6] F. Leopold, M. Ota, D. Klatt and e. al., "Reconstruction of the Unsteady Supersonic Flow around a Spike Using the Colored Background Oriented Schlieren Technique.", *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, pp. 1(2), 69–76, 2013.
- [7] F. Nicolas, V. Todoroff, A. Plyer, G. Le Besnerais, D. Donjat, F. Micheli and F. Champagnat, "A direct approach for instantaneous 3D density field reconstruction from Background Oriented Schlieren (BOS) measurements.", *Experiments in fluids*, , 57(1), 1-21, 2016.
- [8] M. Ota, K. Hamada, H. Kato and e. al., "Computed-tomographic density measurement of supersonic flow field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique.", *Measurement Science and Technology*, pp. vol. 22, no 10, p. 104011., 2011.
- [9] Y. Le Sant, V. Todoroff, A. Bernard-Brunel, G. Le Besnerais, F. Micheli and D. Donjat, "Multi-camera calibration for 3DBOS.", in 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2014.
- [10] Takano, H., Kamikihara, D., Ono, D., Nakao, S., Yamamoto, H., & Miyazato, Y. (2016). "Three-dimensional rainbow schlieren measurements in underexpanded sonic jets from axisymmetric convergent nozzles". *Journal of Thermal Science*, 25(1), 78-83.