

# Reconstruction 3D d'un écoulement de convection par BOS 3D directe

David DONJAT<sup>1\*</sup>, Violaine TODOROFF<sup>1</sup>, Francis MICHELI<sup>1</sup>, Guy LE BESNERAIS<sup>2</sup>, François NICOLAS<sup>1</sup>, Aurélien PLYER<sup>2</sup>, Yves LE SANT<sup>3</sup>, Philippe CORNIC<sup>2</sup>, Frédéric CHAMPAGNAT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ONERA, Centre de Toulouse, DMAE  
2, Avenue Edouard Belin 31055 Toulouse

<sup>2</sup>ONERA, Centre de Palaiseau, DTIM  
Chemin de la Hunière et des Joncherettes, 91123 Palaiseau

<sup>3</sup>ONERA, Centre de Meudon, DAFE  
8, rue des Vertugadins, 92190 MEUDON

\* (auteur correspondant : david.donjat@onera.fr)

**Résumé** - L'Onera travaille depuis quelques années sur la mesure de champs de masse volumique tridimensionnels et instantanés dans le but d'améliorer la caractérisation de différents types d'écoulements complexes aérothermiques et/ou compressibles. La technique choisie est la Background Oriented Schlieren (ou BOS). En effet, la simplicité de cette approche permet de multiplier facilement les points de vue sur une expérimentation donnée afin de réaliser une tomographie de l'écoulement. Un montage expérimental typique comporte une douzaine de caméras regardant toutes la même région de l'espace où se situe l'écoulement d'intérêt. En face de ces caméras des écrans diffusent la lumière d'un système d'éclairage et permettent la prise de vue. Une acquisition consiste en deux jeux d'images : le premier en l'absence d'écoulement et le second en présence de l'écoulement permettant ainsi de détecter les déviations optiques. Pour une caméra, le déplacement des motifs enregistré d'une image à l'autre donne une visualisation des gradients de masse volumique, comme une strioscopie. Une première étape a permis de mettre en place, d'une part, un banc de prise de vues adapté à une exploration 3D d'écoulements de jet, et d'autre part, les éléments algorithmiques et les logiciels sous GPU permettant de partir d'un ensemble de champ de déplacements et, en résolvant le problème inverse associé, de reconstruire directement le champs de masse volumique dans la région de l'espace visée par toutes les caméras. La validation de la méthode a été faite à partir de champs synthétiques de jets propulsifs issus de calculs LES. Les travaux présentés ici sont une application de la méthode sur différents cas d'étude simple de type convection naturelle et faiblement forcée. La figure 1 illustre ainsi la reconstruction d'un champ instantané de masse volumique pour un jet subsonique chaud. Afin de compléter ces premières validations expérimentales, la technique proposée est appliquée pour un cas en soufflerie industrielle. La soufflerie F2 du centre Onera du Fauga Mauzac a une veine de 1.8x1.4m<sup>2</sup> et possède des parois transparentes couvrant la quasi-totalité des côtés de la veine. L'écoulement choisi est un jet chaud issu du saumon d'une demi-voilure très simplifiée et fixée au plancher de la veine. L'écoulement infini amont a une vitesse de 20 m/s. Le système de mesure comprend une douzaine de caméras réparties sur un côté et le plafond de la veine, le sol et l'autre côté de la veine servant d'écrans. Le traitement des images est réalisé avec l'aide de la chaîne logicielle mise en place. Les champs de masse volumique, moyens et instantanés, sont alors calculés, les premiers servant à initialiser le calcul inverse pour évaluer les seconds. En faisant l'hypothèse d'une pression uniforme, il devient possible de comparer quantitativement le champ de température de sondages thermocouples avec le champ de masse volumique moyen évalué, permettant une validation de la méthode BOS3D.

## Nomenclature

$D$	Diamètre de l'éjecteur, $m$
$Q$	Débit massique, $g/s$
$Re$	Nombre de Reynolds
$V$	Vitesse de veine, $m/s$
$x,y,z$	Coordonnées spatiales, $m$
$T$	Température, $^{\circ}C$
$s$	Abscisse curviligne, $m$
$A$	Matrice d'observation

### Symboles grecs

$\rho$	Masse volumique, $kg/m^3$
$\varepsilon$	Déviations angulaires, $rad$
$\Gamma$	Constante de Gladstone-Dale
$\lambda$	Critère de régularisation

### Indices et exposants

$p$	paroi
$j$	jet

## 1. Introduction

Les méthodes optiques strioscopiques utilisent l'information de la variation d'indice de réfraction induit par une fluctuation de masse volumique, générant une déflexion des rayons lumineux entre les différentes régions de l'écoulement. Parmi ces méthodes, la technique BOS (ou « Background Oriented Schlieren ») permet de quantifier la valeur de l'angle de déviation des rayons. Elle apparaît donc comme une véritable méthode indirecte de mesure de masse volumique. Les premiers travaux datent du début des années 2000 et ont été suivis par de nombreuses études démontrant le potentiel applicatif de cette méthode qui peut concerner les écoulements aérodynamiques [1], les phénomènes de sillage [2], les écoulements supersoniques [3], voire les flammes.

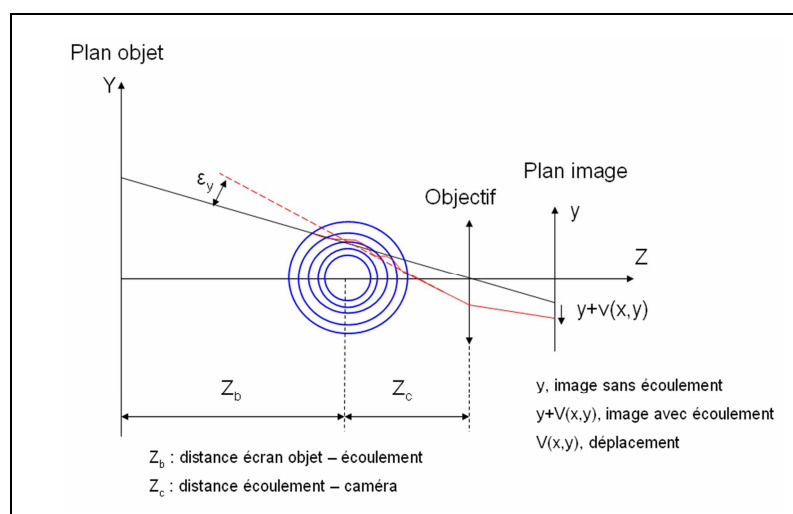


Figure 1 : Principe de la méthode BOS

Dans son principe, qu'illustre la Figure 1, la BOS s'appuie sur un dispositif optiquement simple qui permet de mesurer la déviation des rayons lumineux induite par les gradients d'indice optique observés lors de la traversée d'un écoulement en comparant, via des méthodes d'estimation de flot optique, l'image d'un écran cible placé au-delà de l'écoulement à une image de référence prise sans écoulement. L'analyse des angles de déviations optiques, intégrales du gradient d'indice le long du chemin optique suivant l'équation 1 (où  $d1$ ,  $d2$  sont les coordonnées curvilignes des points d'entrée et de sortie du volume), peut conduire alors à la reconstruction du champ de masse volumique.

$$\varepsilon = \Gamma \int_{d1}^{d2} \nabla \rho \cdot ds \quad (1)$$

Dans des conditions simples, en bidimensionnel et en axisymétrique, des techniques de résolution basées sur des approches analytiques permettent une reconstruction directe à partir d'une seule projection. La reconstruction d'un champ 3D sans propriété de symétrie particulière, ce que nous appellerons BOS3D dans la suite, nécessite l'acquisition de plusieurs projections, la difficulté du problème étant alors très liée au nombre de projections disponibles. Plusieurs travaux récents décrivent des reconstructions tridimensionnelles à partir de données BOS. Dans notre étude, nous privilégions l'approche algébrique qui apparaît comme la plus pertinente puisque son comportement est plus robuste en présence de données limitées et bruitées, situation courante dans le cadre de la BOS3D. Ihrke [4] est le premier à proposer cette méthode dans le cadre du traitement de données BOS. Par la suite, cette approche a été utilisée par Ota afin de reconstruire le champ moyen autour d'un corps asymétrique dans un écoulement à Mach 2 [3] puis d'un écoulement de convection naturelle [5]. Dans les deux cas, la stratégie proposée repose sur une reconstruction des champs de gradients selon les trois directions puis sur une intégration permettant d'obtenir le champ de masse volumique. La méthode proposée par l'ONERA consiste, quant à elle, à reconstruire directement le champ de masse volumique à partir des déviations mesurées [1]. Le problème inverse qui en découle est alors résolu sous la forme d'un problème de minimisation d'un critère régularisé à l'aide d'une méthode de gradient conjugué [6]. L'ensemble des algorithmes est codé sur une architecture GPU (Graphics Processing Units) afin de diminuer le temps de calcul et permettre la reconstruction de champs de grandes dimensions.

Dans cet article, nous exposerons dans un premier temps la méthode de reconstruction directe proposée. Puis nous présenterons des applications sur la reconstruction d'un champ issu d'un calcul numérique à partir d'images BOS simulées qui démontrent le potentiel réel de cette approche. Dans un second temps, nous décrirons la mise en pratique de cette méthode dans le cadre de la mesure d'un écoulement de jet chaud très simplifié, dans un environnement de soufflerie industrielle, en intégrant l'ensemble des contraintes et des difficultés qu'induit une telle installation. Enfin, les résultats obtenus seront présentés et discutés.

## 2. Présentation de la méthode BOS3D

### 2.1. Principe de la méthode et outils algorithmiques

La méthode BOS3D directe nécessite la résolution d'un système matricielle tel que :

$$A \cdot \rho = \varepsilon \quad (2)$$

Où  $A$  est la matrice d'observation qui combine un opérateur de tomographie et des opérateurs de dérivation spatiale,  $\rho$ , la représentation discrète du volume à reconstruire et  $\varepsilon$ , le vecteur des projections (contenant les angles de déviation calculés pour chaque pixel). La dimension du problème est liée à la taille du volume recherché et au nombre de déviations mesurées dépendant de la résolution et du nombre de caméras impliquées. Au total il s'agit donc d'un problème de très grandes dimensions pour lequel les méthodes d'inversion directe ne peuvent être utilisées. Les approches itératives doivent donc être privilégiées en exploitant le parallélisme pour limiter le coût de calcul. Cette formulation directe offre plusieurs avantages essentiels pour la BOS3D. D'une part, elle autorise une grande souplesse d'un point de vue expérimentale, particulièrement pour les applications en soufflerie, puisqu'elle permet en théorie toutes les libertés sur le positionnement des caméras. D'autre part, la régularisation, indispensable pour limiter les effets du bruit présent dans les mesures, peut être définie directement sur des propriétés du volume lui-même. De plus, le problème de BOS3D a un caractère parallélisable indéniable, puisque les trajectoires des rayons lumineux sont indépendantes les unes des autres : une implantation sur une architecture GPU permet donc de limiter le coût de calcul de l'optimisation itérative.

Le principe de la méthode de reconstruction proposée repose sur la construction préalable d'un modèle direct prenant en compte les phénomènes physiques impliqués. La principale difficulté réside dans le calcul de l'intégrale de l'équation 1 qui nécessite la connaissance du chemin optique. Un modèle de lancer de rayon est donc mis en place suivant une approche linéaire reposant sur l'hypothèse paraxiale, valable pour des écoulements de convection où les déviations optiques sont faibles. Ce modèle permet d'intégrer pas-à-pas les contributions de chaque voxel traversé, pour un volume discrétisé suivant une grille de voxels 3D, connaissant l'évolution du gradient d'indice optique. Ce procédé permet de définir les opérations associées à l'opérateur A et de mettre en œuvre une méthode de minimisation itérative d'un critère régularisé tel que :

$$F(\rho) = \|\varepsilon - A\rho\|^2 + \lambda R(\rho) \quad (3)$$

Dans cette expression, la régularisation  $\lambda R(\rho)$  permet de prendre en compte de façon pondérée des informations complémentaires R connues à priori. Le paramètre de régularisation  $\lambda$  doit donc permettre de trouver le meilleur compromis entre la fidélité de la solution aux données mesurées et la fidélité de la solution aux informations connues à priori. Pour les configurations d'écoulement de type convectif, la régularisation quadratique de Tikhonov permettant un lissage de la solution semble adéquat. La fonctionnelle prend alors la forme suivante :

$$F(\rho) = \|\varepsilon - A\rho\|^2 + \lambda \|\nabla\rho\|^2 \quad (4)$$

Différentes stratégies existent alors permettant la détermination du coefficient de pondération  $\lambda$  et la méthode dite de la courbe en L est ici privilégiée [7].

## 2.2. Validations sur données synthétiques

Avant toute utilisation sur données réelles, la qualité de l'algorithme de reconstruction est évalué en travaillant sur un champ de masse volumique issu d'une simulation numérique LES d'un écoulement de jet [9]. A partir d'un champ de masse volumique numérique, une BOS dite synthétique est générée suivant différents points de vue par lancer de rayons (voir une illustration donnée en figure 2).

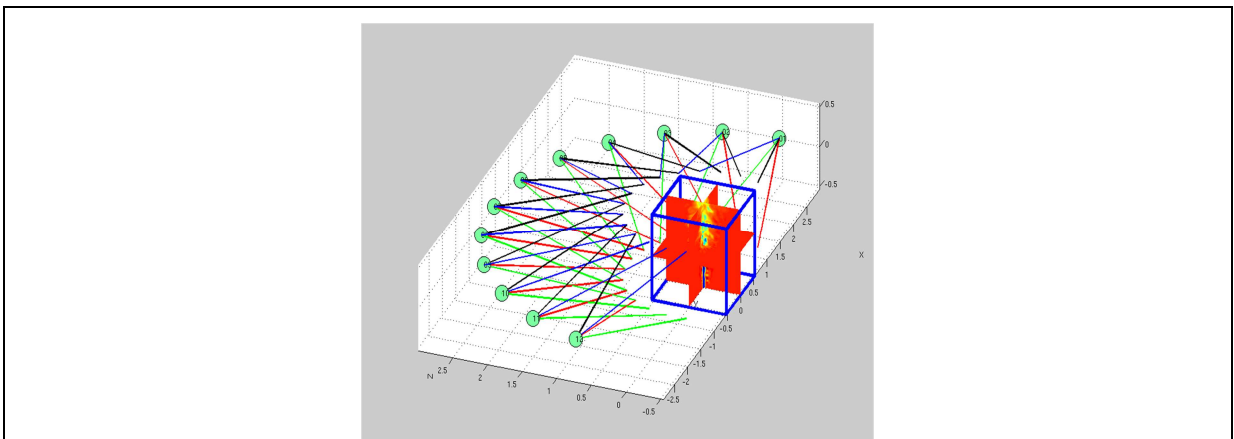
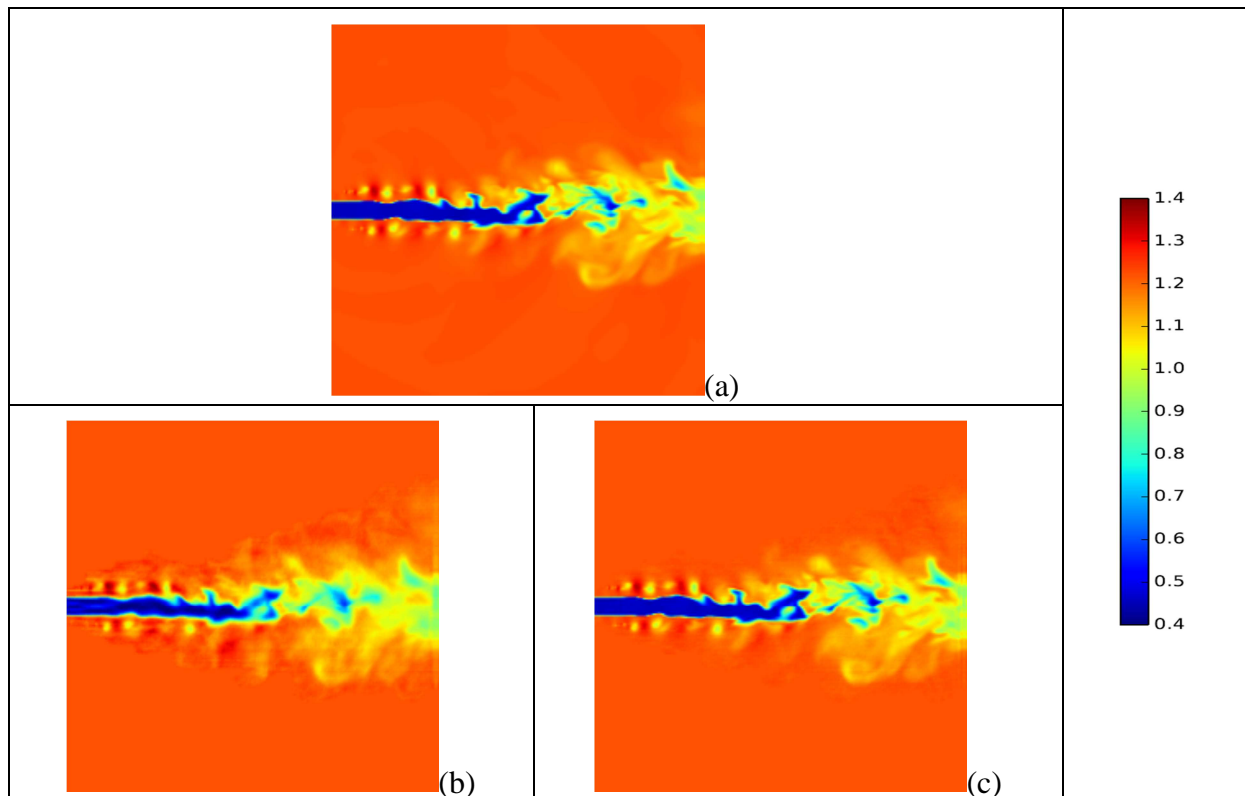


Figure 2 : Position en couronne des 12 caméras autour du jet calculé (sur 180°)

A partir de ces déviations de BOS synthétique, l'algorithme de reconstruction est testé sur des données dégradées par un bruit additif représentatif. Afin d'améliorer la méthode de reconstruction, plusieurs contraintes d'optimisation efficaces, comme le masquage des zones hors écoulement, sont introduites. Les résultats présentés en figure 3 donnent ici une illustration de l'influence du nombre de caméras sur la reconstruction. Comparés au cas de

référence issu du calcul LES, les champs reconstruits, pour lesquelles les différents paramètres ont été optimisés, préservent la topologie de l'écoulement instantané et, pour un grand nombre de projections, l'erreur de reconstruction est particulièrement faible. De plus, il est intéressant de remarquer que pour un faible nombre de projections, l'approche quadratique choisi dans notre cas lisse fortement le signal bruité en particulier au niveau de la zone de développement de la couche de mélange. Néanmoins, elle conserve de façon très satisfaisante toute la complexité de la topologie du jet tout en préservant en grande partie l'amplitude du signal.



. Figure 3 : Comparaison des champs reconstruits par rapport au cas synthétique (a) : 12 caméras (b), 50 caméras (c) – Répartition en couronne sur 180° (Taille du volume reconstruit : 300 voxels<sup>3</sup>)

### 3. Application de la méthode en soufflerie de recherche

#### 3.1. Présentation de l'expérience

Une maquette conçue spécifiquement pour cette étude est installée dans la veine de la soufflerie F2 de l'ONERA (de dimensions 2 m\*1,4 m). Cette maquette est constituée d'un jet chaud de diamètre intérieur égal à 54mm, débouchant au niveau du saumon d'une aile simplifiée (définie par une envergure de 800mm et une épaisseur de 90mm). Le débit  $Q$  et la température  $T$  du jet sont mesurés et varient sur une plage respectivement de 80 à 160 g/s et de 30 à 140°C. Cet écoulement est co-courant avec l'écoulement de la soufflerie qui est établi à une vitesse de 20 m/s jusqu'à 50 m/s, aux conditions génératrices ambiantes. Le choix de vitesses d'entraînement faibles est dicté par la volonté de travailler sur une configuration aérothermique où les effets de pression restent négligeables par rapport aux effets thermiques. La figure 4 donne une illustration de l'installation de la maquette dans la veine d'étude de la soufflerie.

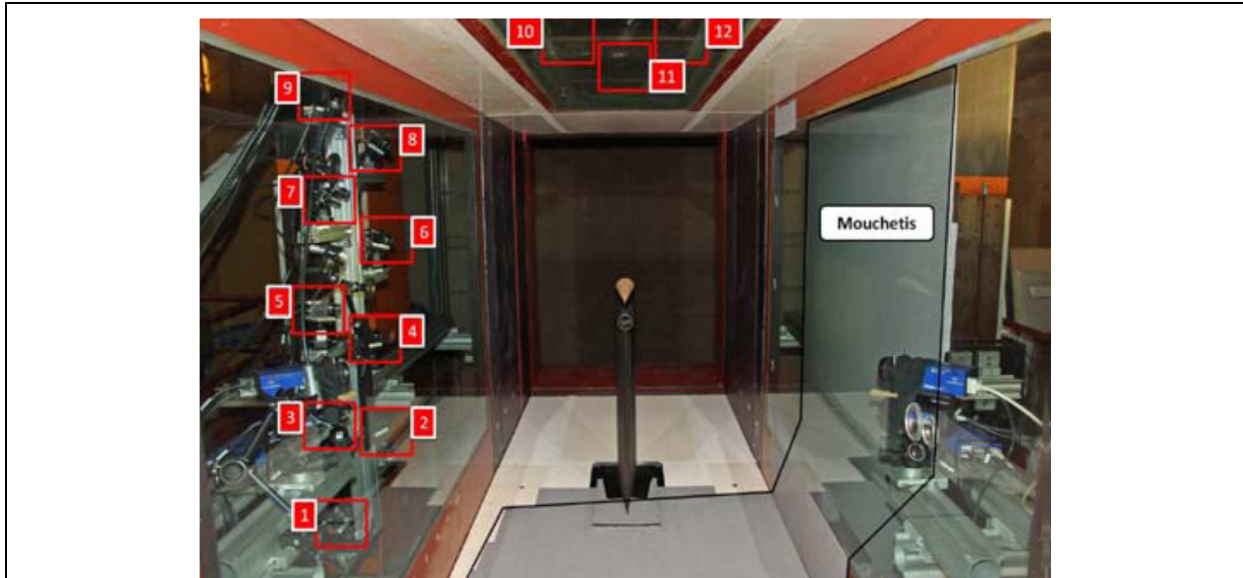


Figure 4 : La maquette et son installation en soufflerie

La soufflerie F2 est équipée de nombreuses parois transparentes ce qui autorise l'utilisation de la technique BOS3D. Cette dernière utilise douze caméras JAI BM500 GE réparties entre le côté gauche SP et le plafond de la soufflerie. Chaque caméra a une résolution de  $2500 \times 2000$  pixels<sup>2</sup> et fonctionnent à une cadence de 10 Hz. Elles sont équipées d'une focale de 50mm. Elles sont reliées à un PC d'acquisition via un concentrateur Gigabit LINKSIS SRW2016. Ces caméras sont mises au point sur des panneaux positionnés sur les autres faces de la soufflerie sur lesquels est imprimé un fond moucheté « semi-aléatoire » dont les propriétés géométriques sont adaptées aux dimensions du banc (voir Figure 4). Ce fond moucheté est une évolution des fonds classiquement exploités en BOS et permet d'assurer un niveau d'informations suffisant dans toutes les fenêtres d'interrogation lors du traitement par flot optique. L'éclairage de la scène est un élément déterminant pour obtenir une qualité d'image suffisante pour le post-traitement. Cela passe ainsi par une uniformisation de l'éclairage sur l'ensemble des fonds et une intensité compatible avec les temps d'exposition souhaités. Ici, une source laser YAG double cavités est utilisée permettant une illumination homogène de la scène pour une étude des champs instantanés. Ce matériel génère ainsi des illuminations brèves (6 ns par flash) et très intenses à une cadence maxi 10 Hz. Un montage optique particulier a été conçu afin de diviser le rayon lumineux en plusieurs faisceaux de lumière (conduits par guide de lumière) capables d'éclairer une grande surface. Le système d'acquisition permet alors la synchronisation de l'ensemble des éléments d'éclairage et de prises de vue. Cette synchronisation est réalisée avec l'aide d'un cadenceur qui permet de générer des signaux TTL qui pilotent les caméras et le laser. Le cadenceur utilisé ici est un SpinCore PulseBlasterUSB comportant 24 sorties indépendantes.

L'exploration de l'écoulement par BOS3D est complétée par des mesures de stéréo-PIV et par des sondages thermocouples aux abords de l'éjection. Ces dernières données ont pour but de donner des éléments de comparaison avec les mesures quantitatives fournies par la BOS. Enfin, la dernière partie de la campagne de mesure a permis de réaliser une mesure combinée BOS3D/stéréo-PIV en pilotant la source laser utilisée pour les deux techniques et en entrelaçant les deux images PIV avec la prise de vue BOS.

### 3.2. Résultats et analyses

La mise en œuvre de la reconstruction 3D d'un champ à partir des images BOS acquises avec le système décrit précédemment nécessite au préalable une étape de pré-traitement des images afin d'extraire les données d'entrée, ainsi qu'une étape de calibration géométrique. Après un pré-traitement des images pour corriger les effets de distorsion à partir des données de calibration intrinsèque réalisée au préalable, les données BOS sont traitées par flot optique avec l'aide du logiciel FOLKI-SPIV développé par l'ONERA [7]. Les champs de déplacement obtenus (voir par exemple la Figure 5) sont alors exploités afin d'extraire les données de déviations suivant les trois directions. Ensuite ces cartographies sont combinées dans le logiciel de reconstruction 3D. Après optimisation du critère de régularisation quadratique, un champ 3D de masse volumique est calculé (voir Figure 5).

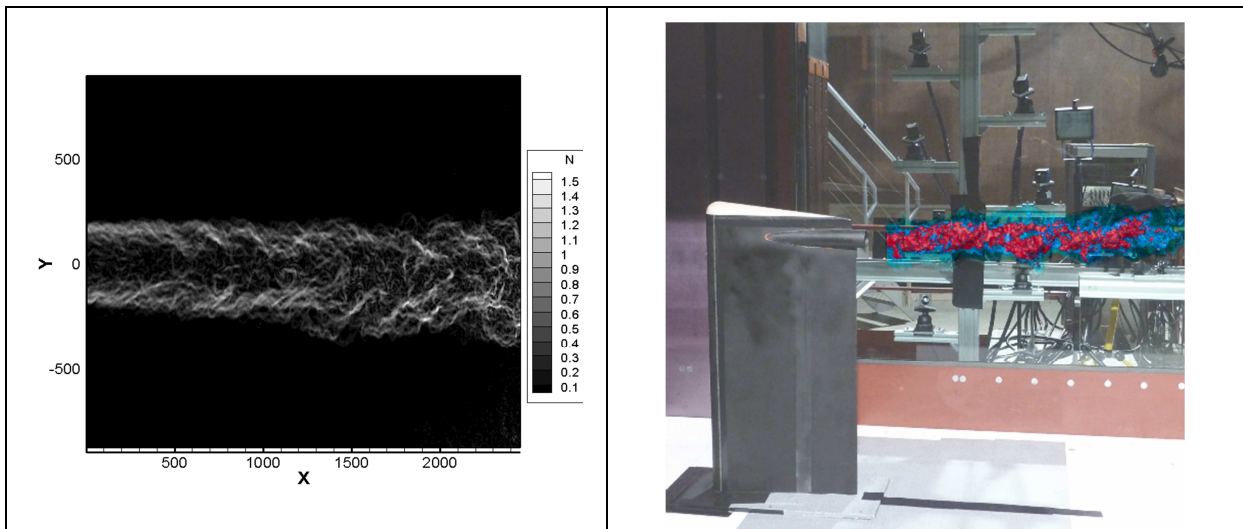


Figure 5 : à gauche : Cartographie de la norme des déplacements mesurés par BOS (caméra 5) – A droite : Reconstruction du jet par BOS3D – Visualisation par isodensités (Cas  $Q=80$  g/s –  $T_j = 100^\circ\text{C}$ )

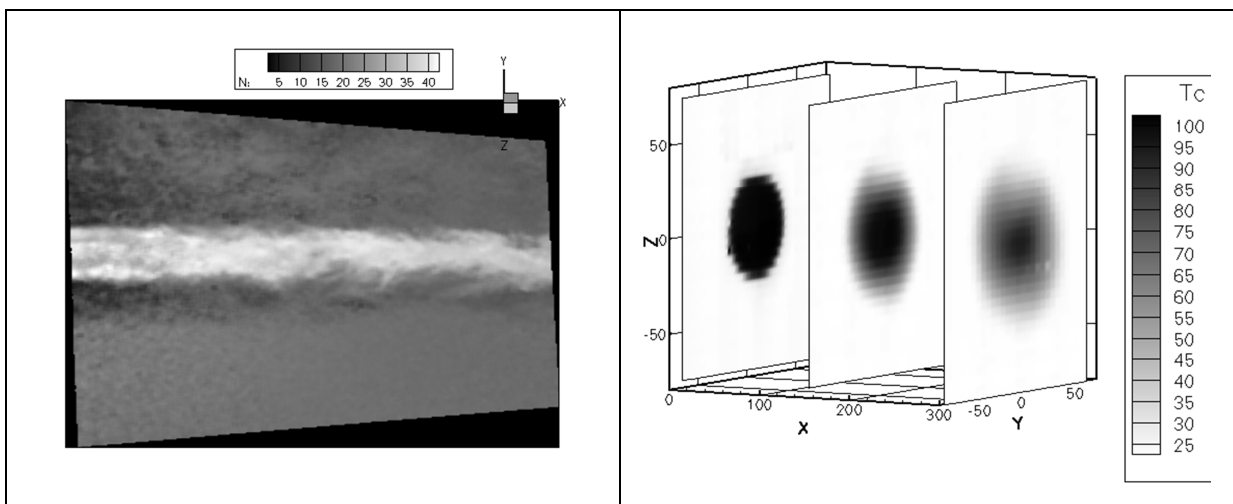


Figure 6 : Champ de la norme de vitesse obtenu par PIV (en m/s) et sondage thermocouple (en  $^\circ\text{C}$ ) (Cas  $Q=80$  g/s –  $T_j = 100^\circ\text{C}$ )

Ces données sont complétées par des mesures de PIV et des mesures de température par peigne de thermocouples en différentes abscisses telles qu'illustrées par la Figure 6. Ces

mesures donnent une représentation complémentaire du jet co-courant et apportent des éléments de validation de la méthode BOS3D. La PIV montre une topologie de jet comparable aux données BOS et la combinaison des deux techniques offrent la possibilité d'avoir au même instant les champs de vitesse et de masse volumique. De plus, en considérant une influence négligeable de la pression, les cartographies de température permettent de remonter directement aux niveaux de masse volumique et offrent une possibilité de valider les champs 3D moyennés obtenus avec la nouvelle méthode BOS3D. Ainsi, malgré le faible nombre de projections utilisées, le résultat obtenu est tout à fait conforme à la topologie d'un jet chaud entraîné par un écoulement ambiant et les niveaux de masse volumique atteints sont comparables aux valeurs attendues dans le cas étudié. L'analyse des performances de la méthode montre de plus que la sensibilité de la technique dépend grandement des conditions optiques mises en place. Dans le cas présent, la méthode est adaptée afin de détecter des déplacements induits par des effets aéro-optiques générés par un écart de température d'une dizaine de degrés Celsius seulement.

#### 4. Conclusion

Une méthode directe de reconstruction 3D du champ de masse volumique à partir de données BOS est présentée. Dans le cas des écoulements de convection, cette technique permet de reconstruire la topologie de l'écoulement ainsi que, sous certaines hypothèses, le champ de température à l'origine des variations de masse volumique. L'adaptation de la méthode BOS3D dans le cadre de son utilisation en grandes souffleries est présentée au travers d'une expérience réalisée dans la soufflerie F2 sur un jet chaud co-courant. Dans le cadre de cette campagne plusieurs techniques ont été mises en œuvre séquentiellement ou en parallèle afin d'obtenir une cartographie 3D de l'écoulement en vitesse, température et masse volumique. Les résultats obtenus illustrent le très grand intérêt de la BOS3D dans un contexte de mécanique des fluides expérimentale.

#### Références

- [1] V. Todoroff, [2013] Mesure d'un champ de masse volumique par BOS3D. Etude d'un dispositif expérimental et des méthodes de traitement pour la résolution du problème inverse, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse
- [2] Raffel M., Heineck J.T., Schairer E., Leopold F., Kindler K., [2014] BOS Imaging for full-scale and in-flight testing, *Journal of the American Helicopter Society*, Vol 59
- [3] Ota M., Hamada K., Kato H., Maeno K., [2011] Computed-tomographic density measurement of supersonic flow field by colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique, *Measurement Science and Technolgy*, Vol 22, pages 104-111
- [4] Ihrke I., [2007] Reconstruction and rendering of time-varying natural phenomena, PhD thesis, Max-Planck-Institut für Informatik
- [5] Ota [2014] Simultaneous Multi Angle Measurement of Natural Convection by Colored-Grid Background Oriented Schlieren (CGBOS) Technique
- [6] Labat C. et Idier J., [2008] Convergence of conjugate gradient methods with a closed-form stepsize formula, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol 136, pages 43-60
- [7] Idier J., *Bayesian Approach to Inverse Problems* (2008)
- [8] F. Champagnat et al., Fast and accurate PIV computation using highly parallel iterative correlation maximization, *Experiment in Fluids*, 50 (2011), 1169-1182
- [9] F. Vuillot, N. Lupoglazoff, G. Rahier, Double stream nozzles flow and noise computations and comparisons to experiments, *Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (2008)