

Application de la méthode CBOS aux écoulements hydrodynamiques : Analyse des échanges thermiques

F. LEOPOLD^a, D. KLATT^b, F. JAGUSINSKI^c

a,b,c Institut franco-allemand de Recherches de Saint-Louis, 68300 SAINT-LOUIS

friedrich.leopold@isl.eu

daniel.klatt@isl.eu

frederique.jagusinski@isl.eu

Résumé :

La technique CBOS (Colored Background Oriented Schlieren) ou Strioscopie Couleur Orientée vers l'arrière-plan, a été mise en œuvre dans le cadre d'écoulements hydrodynamiques afin d'analyser les échanges thermiques lors de l'entrée d'un jet d'eau (44°C), par un orifice de diamètre de 4mm dans un réservoir (0,4 x 0,3 x 0,2m³) lui-même rempli d'eau à température ambiante.

Cette technique permet de mesurer la déflexion de la lumière due à la présence de gradients de l'indice de réfraction dans un écoulement, à partir de la distorsion d'une image d'arrière-plan en couleurs.

L'analyse de la distorsion s'effectue à partir de l'enregistrement de deux images de l'arrière-plan (l'une en l'absence d'écoulement, l'autre lors de l'injection), par un appareil photo numérique.

Le déplacement apparent d'un point entre l'image de référence et l'image de mesure peut être déterminé par deux méthodes différentes.

La première utilise un algorithme d'interrogation basé sur la corrélation alors que la seconde approche est issue de la méthode différentielle, mettant en rapport les variations spatiales et temporelles sur la première image et les différences de niveaux de gris entre la première et la seconde image.

L'analyse des images grâce à ces deux méthodes permet de mettre en évidence la transition laminaire-turbulent du jet d'eau et de visualiser les structures turbulentes de celui-ci.

Abstract :

The CBOS (Colored Background Oriented Schlieren) has been used for hydrodynamic flows in order to analyze thermal exchanges. The case of an injection of a water (44°C), through a 4mm diameter hole in tank (0,4x0,3x0,2m³) with water at ambient temperature is studied.

This method allows to measure the light deflection due to the presence of refractive index gradients in a flow, from the distortion of a color background image.

To analyze the distortion, two images of the background (one without flow, the other during the injection) are recorded with a digital camera. The apparent displacement of a point between the reference image and the measurement image can be determined by two different methods.

The first method uses an interrogation algorithm which is based on correlations and the second one comes from a differential approach, comparing the spatial and temporal variations on the first image and the differences of grey levels between the first and the second image.

Using these methods, it is possible to highlight the laminar-turbulent transition of the water injection and to visualize the turbulent structures of the jet.

Mots clefs : Hydrodynamique, Ecoulement, Echanges thermiques, CBOS, Laminaire, Turbulent

1 Introduction

La technique CBOS (Colored Background Oriented Schlieren) ou Strioscopie Couleur Orientée vers l'arrière-plan, généralement utilisée pour l'étude d'écoulements aérodynamiques, est appliquée ici au milieu hydrodynamique afin d'analyser les échanges thermiques dans le cas d'un jet d'eau (chaude) pénétrant par un orifice dans un réservoir lui-même rempli d'eau (à température ambiante).

La mise en œuvre de cette expérience, les mesures réalisées, leur analyse et les conclusions qui en découlent sont précédées d'une présentation de la technique CBOS et des différentes méthodes d'analyse des mesures.

2 Strioscopie Couleur Orientée vers l'Arrière-plan (CBOS)

2.1 Principe

Issue de la technique antérieure BOS, la technique CBOS permet de mesurer la déviation de la lumière due à la présence de gradients de densité dans un écoulement, pouvant faire état d'une variation de gradient d'indice de réfraction, en utilisant la distorsion de l'image d'un arrière-plan monochrome (BOS) ou en couleurs (CBOS)[1].

Un schéma du montage optique de base est donné ci-après (Cf. Figure 1).

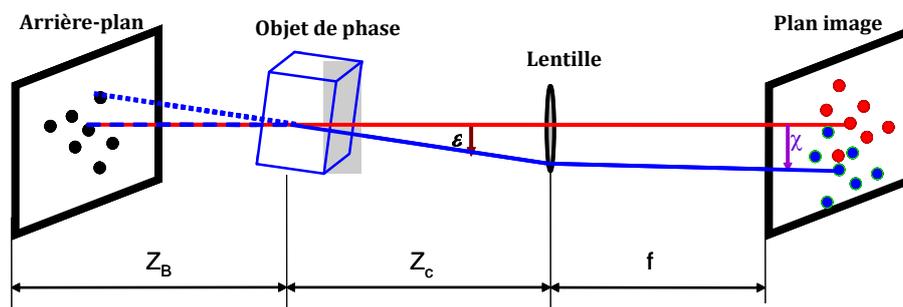


Figure 1 : Montage optique pour la technique CBOS

f est la distance focale, Z_B la distance entre la maquette et l'arrière-plan, Z_C la distance entre la maquette et l'objectif de l'appareil photo, ε l'angle de déviation du rayon lumineux et χ le déplacement d'un point de l'arrière-plan. Dans les écoulements compressibles ou présentant une variation de gradient d'indice de réfraction, grâce à la relation empirique de Gladstone-Dale, l'indice de réfraction n est directement lié à la densité ρ par :

$$\frac{n-1}{\rho} = \frac{n_0-1}{\rho_0} = \text{const} = G(\lambda)$$

L'indice 0 indique le milieu au repos. $G(\lambda)$ est le nombre de *Gladstone-Dale*, qui dépend des caractéristiques du milieu et de la longueur d'onde de la lumière, λ . Les variations du nombre de *Gladstone-Dale* dans le domaine visible du spectre étant très faibles, sa valeur sera fixée à $G(\bar{\lambda}) = 3.34 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{kg}$ pour une longueur d'onde moyenne de $\lambda \approx 550 \text{ nm}$.

La distorsion χ peut s'exprimer par l'intégration du gradient local de la densité le long du trajet optique :

$$\chi = \frac{f \cdot Z_B}{Z_C + Z_B - f} \int_{\Delta z} \frac{1}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial r(x, y)} dz$$

2.2 Arrière-plan

La technique CBOS est basée sur le même principe que la technique BOS (Background Oriented Schlieren), mais utilise une répartition de points en couleurs sur l'image d'arrière-plan.

Classiquement, la technique BOS utilise un mouchetis, composé d'un ensemble de points monochromes générés de manière aléatoire par ordinateur et placé à l'arrière du volume de test. Ce mouchetis doit avoir une fréquence spatiale élevée et présenter un fort contraste. Des études préliminaires ont montré qu'une répartition optimale consistait en un nombre de points recouvrant entre 30% et 50% de la surface de l'image d'arrière-plan.

Pour la technique CBOS, ce sont les couleurs primaires (le rouge, le vert, le bleu, selon le modèle RGB), facilement identifiables par des appareils photos numériques du commerce, qui sont généralement utilisées sur les images d'arrière-plan. La même proportion que précédemment, mais pour chacune des couleurs primaires, est appliquée dans la répartition, au hasard, des points sur l'image d'arrière-plan. Ceci conduit à un ensemble de points de couleurs pures ou composées (fig. 2.) et il a été observé qu'avec un taux de 35% pour chacune des couleurs primaires, la répartition finale présentait un maximum de couleurs pures. Dans cette configuration, les couleurs composées et les zones non colorées occupent chacune environ 30% de la surface de l'arrière-plan. Une image typique est montrée en figure 3.

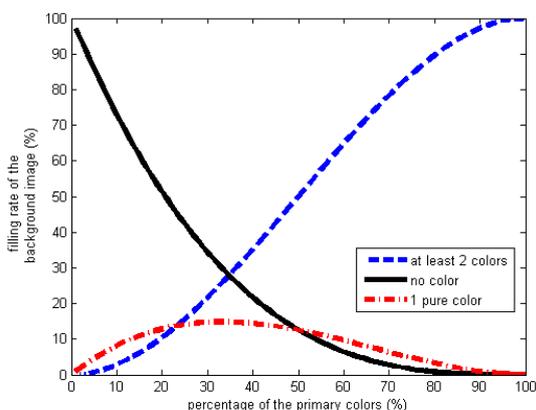


Figure 2 : Dosage des couleurs en fonction du pourcentage de couleurs primaires

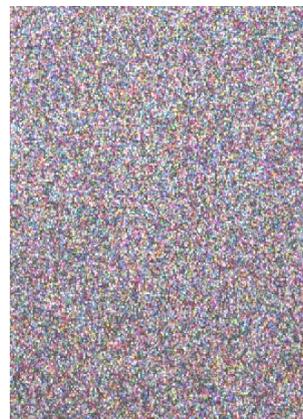


Figure 3 : Exemple typique d'arrière-plan en couleurs utilisé en CBOS

Le post-traitement des images CBOS intègre le fait que l'appareil photo digital possède des capteurs pour ces couleurs primaires; les données sont donc directement stockées dans un fichier, en un format brut adéquat. Par une décomposition en trois couleurs primaires, huit différents mouchetis élémentaires de points peuvent être extraits de l'image enregistrée (Cf. Figure 4).

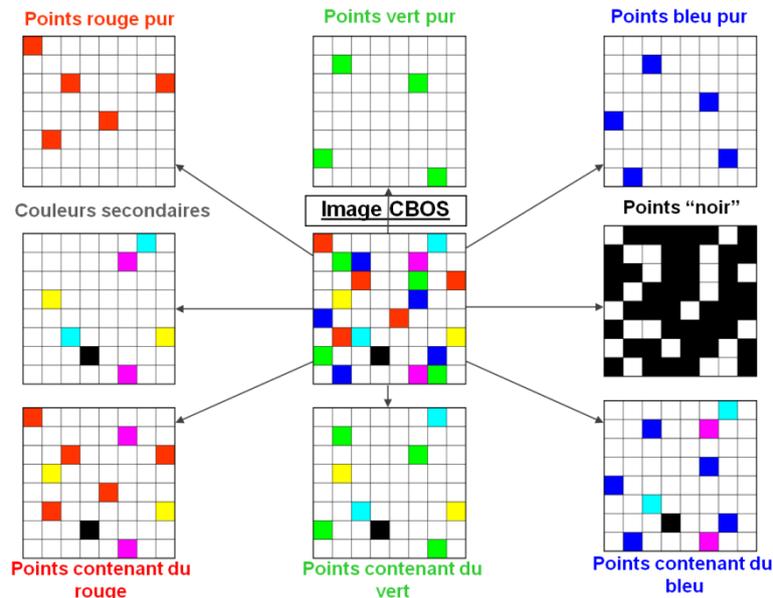


Figure 4 : Extraction des huit échantillons de points élémentaires à partir de l'image d'arrière-plan en couleurs

2.3 Détermination des déplacements

Le calcul des déplacements entre les images de référence et de mesure peut s'effectuer selon 2 méthodes.

La méthode traditionnellement utilisée s'appuie sur la technique de corrélation associée à la Transformée de Fourier rapide (FFT).

La seconde méthode suit une approche « différentielle ».

1^{ère} méthode : Corrélation et Transformée de Fourier

L'algorithme d'interrogation basé sur la corrélation a été largement utilisé dans l'exploitation de la technique PIV (Particle Image Velocimetry ou Vélocimétrie par Images de Particules).

Dans le cas de la CBOS, pour une paire d'images enregistrées, l'algorithme d'interrogation est appliqué à 2 portions d'images de même taille. Traditionnellement les 2 échantillons sont choisis respectivement dans la première et la seconde image, aux mêmes coordonnées.

La fonction d'évaluation Θ s'écrit simplement :

$$\Theta_{corr}(m, n) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g_1(i, j) \cdot g_2(i + m, j + n)$$

où $g_1(i, j)$ et $g_2(i, j)$ sont les niveaux de gris des deux échantillons réduits à une fenêtre d'interrogation de taille $M \times N$ pixels.

Lorsque le calcul du coefficient de corrélation $\Theta_{\text{cor}}(m, n)$ est accéléré grâce la transformée de Fourier rapide (FFT), $g_1(i, j)$ et $g_2(i, j)$ sont supposés répartis de manière périodique dans le plan i - j avec pour période $M \times N$.

Cette hypothèse de périodicité favorise une estimation rapide et rend l'algorithme d'interrogation basé sur la corrélation insensible à la variation d'éclairage entre les deux enregistrements[2].

Cependant, l'utilisation de la FFT présente plusieurs inconvénients tels que des erreurs d'évaluation dans le cas de déplacements importants ou dans le cas d'un déplacement proche de zéro, ce qui accroît les incertitudes dans les mesures.

Afin de réduire les erreurs lorsque les déplacements sur l'image sont importants, un glissement (en pixels) de la fenêtre d'interrogation est appliqué (Willert 1996; Westerweel et al. 1997). Cependant un décalage discret de la fenêtre d'interrogation conduit à un effet de « peak-locking ».

Pour la détermination des très petits déplacements, une technique simple et efficace consiste à faire glisser en continu la fenêtre d'interrogation sur la seconde image. La répartition des niveaux de gris $g_1(i, j)$ ne peut néanmoins pas être obtenue directement à partir de la seconde image, une interpolation s'avérant nécessaire. On supposera que les glissements X et Y continus des fenêtres, $X = I + x$ et $Y = J + y$ permettent de déterminer la répartition des niveaux de gris sur la fenêtre d'interrogation de la seconde image $g_2(i, j)$ à partir de la répartition des niveaux de gris de la totalité de deuxième image $G_2(i, j)$. Ici I, J sont les nombres entiers de pixels et x, y des réels compris entre 0,00 et 1,00 représentant les sous-pixels du glissement.

L'interpolation fait intervenir la fonction bilinéaire suivante :

$$g_2(i, j) = (1-x).(1-y).G_2(i+I, j+J) + x.(1-y).G_2(i+I+1, j+J) \\ + (1-x).y.G_2(i+I, j+J+1) + x.y.G_2(i+I+1, j+J+1)$$

2^{ème} méthode : Méthode différentielle

Cette approche est issue de la méthode différentielle proposée par Bruce D. Lucas and Takeo Kanade[3]. La variation des niveaux de gris entre les 2 images peuvent être déterminés par la formule :

$$\frac{\partial g_1(i, j)}{\partial x} dx + \frac{\partial g_1(i, j)}{\partial y} dy = \frac{\partial g_1(i, j)}{\partial t} dt \approx g_2(i, j) - g_1(i, j)$$

Celle-ci met en rapport les variations spatiales et temporelles sur la première image et les différences de niveaux de gris entre la première et la seconde image.

La résolution de cette équation s'effectue par itérations successives et l'erreur résiduelle est déjà, après le premier pas, inférieure à un pourcent.

Comparaison entre la méthode de corrélation/FFT et la méthode différentielle

La méthode différentielle n'accepte pas de variations d'intensité entre les deux images et il apparaît que des déplacements supérieurs à un pixel peuvent conduire à des erreurs.

Si des déplacements plus importants sont à considérer, la taille des images doit être réduite et les résultats transposés vers des dimensions plus importantes jusqu'à atteindre l'originale.

Pour des petits déplacements et des petites fenêtres d'interrogation la méthode différentielle est plus précise (Cf. Figure 5).

En revanche, la méthode de corrélation croisée basée sur un déplacement continu de la fenêtre d'interrogation est supérieure à la méthode différentielle pour la fiabilité de détection, la précision et la rapidité. La gamme des déplacements autorisés est également plus étendue. La méthode différentielle quant à elle est davantage adaptée aux enregistrements CBOS contenant des rotations et permet d'obtenir une résolution spatiale très élevée.

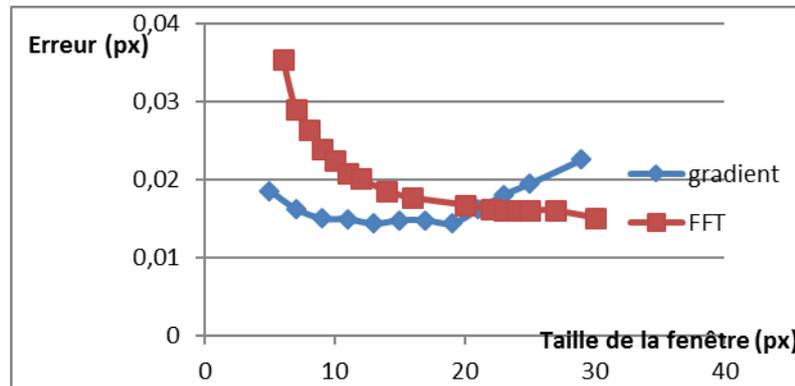


Figure 5 : Comparaison des méthodes de corrélation/FFT et différentielle

3 Application de la CBOS aux écoulements hydrodynamiques

3.1 Dispositif expérimental

L'analyse des échanges thermiques en milieu hydrodynamique s'effectue à partir de l'entrée d'un jet d'eau (vitesse : 26 cm/s, température 44°C) dans un réservoir (0,4 x 0,3 x 0,2 m³) rempli d'eau à température ambiante (24°C), par un orifice de 4mm de diamètre.

Le dispositif de mesures s'appuie sur l'utilisation d'un appareil photo numérique (CANON EOS 1D) et d'un arrière-plan en couleurs de 2010 pixels x 2890 pixels.

Les prises de vues sont réalisées dans les conditions suivantes :

- Distance Objectif / Arrière-plan : 53 cm
- Distance Arrière-plan / Jet : 16 cm
- Durée d'exposition : 1/125 s
- Diaphragme : f/22

3.1 Résultats

Un exemple de résultats par application de la méthode *Corrélation et Transformée de Fourier* est donné en Figure 6.

Le mélange entre l'eau à température ambiante et l'eau chaude du jet est bien visible et l'analyse des images permet de mettre en évidence la transition laminaire-turbulent du jet d'eau et de visualiser les structures turbulentes de celui-ci.

On notera que les structures sont moins marquées pour des déplacements en x (horizontaux) que pour les déplacements en y (verticaux).

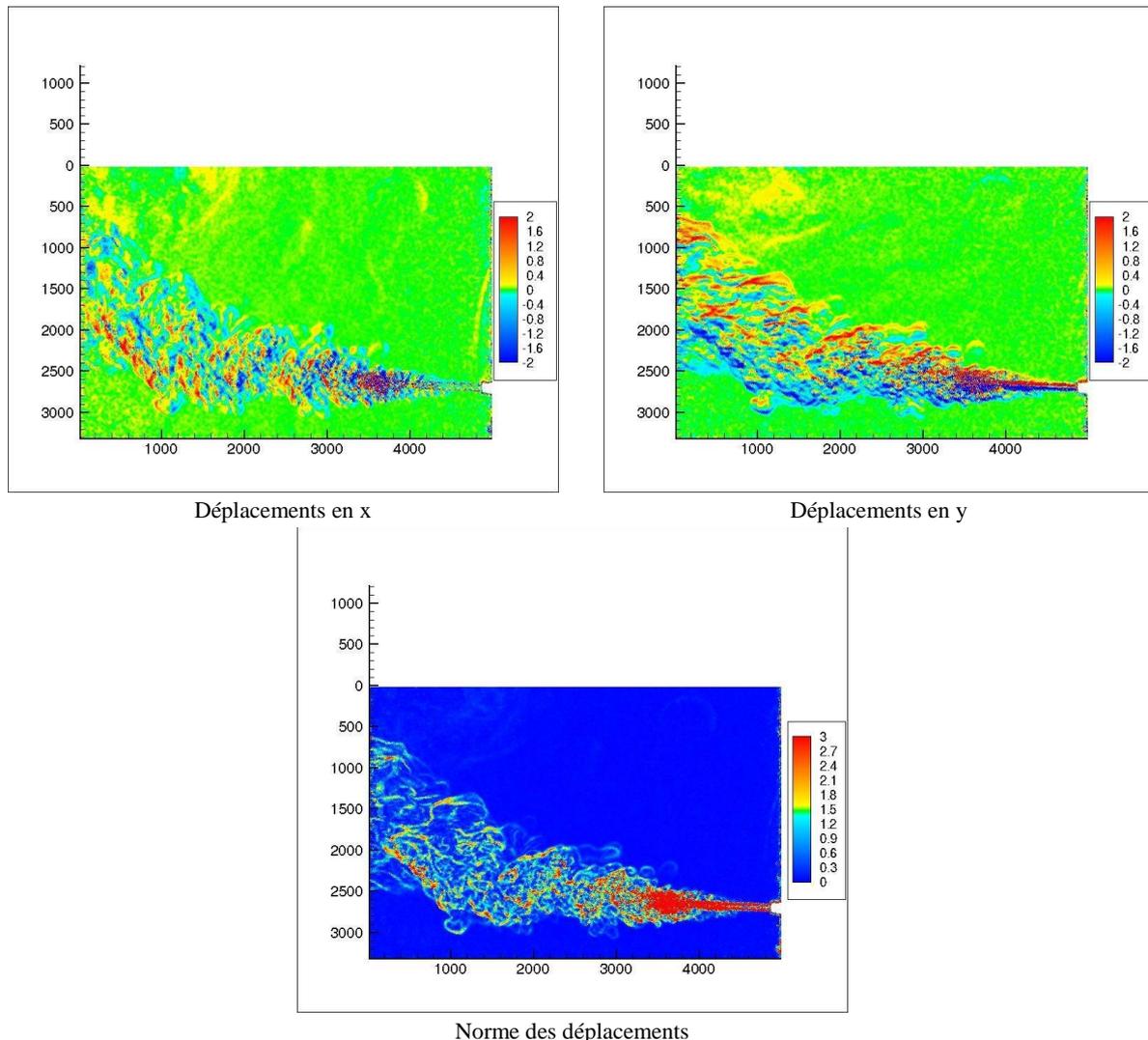


Figure 6 : Déplacements (x , y et norme) entre image de mesures et image de référence
(Méthode : Corrélation et Transformée de Fourier)

4 Conclusion

Des résultats obtenus il apparaît que la technique CBOS (Colored Background Oriented Schlieren), développée pour les écoulements de fluides compressibles et principalement appliquée aux écoulements d'air, peut également être mise en œuvre pour les écoulements hydrodynamiques.

Références

- [1] Richard H, Raffel M., (2001) Principle and Applications of the Background Oriented Schlieren (BOS) method, Meas. Sci. Technol., Vol. 12, No. 9, pp. 1576-1585.
- [2] Settles G S., (2001) Schlieren and Shadowgraph Techniques, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp. 1-21.
- [3] Bruce D. Lucas and Takeo Kanade Bruce D. Lucas and Takeo Kanade, An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981