



MESURE D'UN CHAMP DE PRESSION INSTANTANÉE SUR LA BASE D'UNE TRAJECTOIRE DE FLUIDE

Young Jin Jeon ^{a,*}, Ludovic Chatellier ^a, Thibaut Tronchin ^a, Laurent David ^a

(a) Institut P PRIME, UPR3346, CNRS – Université de Poitiers – ISAE-ENSMA, 86962, Futuroscope Cédex, France

*Correspondant: young.jin.jeon@univ-poitiers.fr

Résumé : Les champs instantanés de pression autour d'une aile sont évalués à partir de mesures par PIV. Pour fournir des champs de vitesse et d'accélération matérielle les plus précis possible pour évaluer ensuite la pression, une nouvelle méthode de PIV multi-frames (FTEE), capable d'évaluer une trajectoire fluide à partir d'une moyenne d'ensemble du signal d'inter-corrélation, est appliquée. En supposant que la trajectoire fluide suit un modèle polynomial avec un ordre prescrit, la vitesse et l'accélération matérielle peuvent être obtenues simultanément. Ensuite, le champ de gradient de pression est directement calculé puis est fourni à la procédure d'intégration spatiale pour l'estimation du champ instantané de pression. Des expériences résolues en temps (TR-PIV) des écoulements 2D et 3D sur un profil d'aile fixe ou en mouvement de révolution ont été menées afin d'évaluer la méthodologie développée.

1 Introduction

Le champ instantané de pression dans un fluide est une information essentielle afin de comprendre de nombreux problèmes d'ingénierie. À ce jour, des efforts importants ont été accomplis afin d'exploiter la vélocimétrie par images de particules (PIV) pour mesurer la distribution de la pression. Pour déterminer le champ instantané de pression à l'aide de la PIV, le tenseur de gradient de pression doit être évalué avant l'intégration spatiale. Par conséquent, non seulement la vitesse, mais aussi l'accélération matérielle sont généralement nécessaires. L'obtention de données PIV résolues en temps étant rendue possible par la mise en œuvre de dispositifs à haute cadence, plusieurs auteurs ont proposé des techniques d'estimation de données temporelles, telles que l'accélération matérielle [1].

La séquence d'images de particules obtenue à partir d'un système d'acquisition haute cadence présente généralement une faible qualité d'image en raison de la grande taille des pixels sur les capteurs (mauvais échantillonnage des particules) mais également de la faible énergie des lasers [2, 3]. Afin d'améliorer la précision des champs de vitesse, des approches basées sur plusieurs images sont employées. Trois concepts principaux ont été proposés : la séparation temporelle optimale [4], la moyenne d'ensemble des inter-corrélations [5], la trajectoire fluide Lagrangienne [6]. La présente étude utilise une méthode d'évaluation de la trajectoire fluide basée sur une moyenne d'ensemble des inter-corrélations (FTEE) [7, 8], qui consiste en une combinaison de deux concepts : la trajectoire Lagrangienne et la moyenne d'ensemble des inter-corrélations, afin de mettre en synergie leurs avantages respectifs. L'accélération matérielle est ensuite évaluée

directement par dérivation le long du profil de la trajectoire fluide.

Dans cette étude, la trajectoire Lagrangienne est obtenue en recherchant un ensemble de coefficients polynomiaux qui maximise la valeur de la moyenne d'ensemble des inter-corrélations le long de la trajectoire à l'aide de la méthode FTEE (Fluid Trajectory Evaluation by an Ensemble average). La vitesse et l'accélération matérielle sont alors déduites directement à partir de la trajectoire, et introduites dans l'évaluation du champ instantané de pression au moyen d'une intégration itérative spatiale [9, 10]. Pour connaître l'efficacité de la méthode FTEE, des champs de pression instantanés sont obtenus à partir d'expériences 2D et 3D : une première expérience pour un écoulement autour d'un profil d'aile fixe [11] mesurée par TR PIV 2D, une seconde expérience de PIV 3D autour d'une aile battante en mouvement de révolution à l'aide d'une tomographie par balayage [9, 10].

2 Méthodes d'analyse

2.1 La méthode de PIV résolue en temps, FTEE

La solution de la méthode FTEE est fournie sous la forme d'une trajectoire décrite par une formulation polynomiale de type:

$$(\mathbf{x}, n) = \sum_{q=1}^P \mathbf{a}_q(\mathbf{x}) n^q, \quad (1)$$

où n est le pas de temps normalisé avec $n = t / \Delta t$ tandis que Δt est l'intervalle temporel entre deux enregistrements séquentiels, et la trajectoire est définie pour toutes les mesures de temps de $n = -T$ à $+T$. (\mathbf{x}, n) est la trajectoire de fluide par rapport à \mathbf{x} , la position du vecteur dans l'image des particules de référence à $n = 0$. P est l'ordre du polynôme et \mathbf{a}_q est le $q^{\text{ième}}$ coefficient du polynôme. Cette

représentation est équivalente à la méthode de corrélation de la trajectoire fluide (FTC) [6], mais la trajectoire est ici obtenue de manière différente. Comme cela est représenté sur la figure 1 et contrairement à la méthode FTC qui obtient la trajectoire fluide à partir des pics d'inter-corrélations au moyen de la méthode des moindres carrés, la méthode FTEE identifie la trajectoire qui maximise la valeur moyenne des inter-corrélations entre les différentes images. Cela signifie que la méthode FTEE est plus robuste au bruit de mesure de valeur de l'inter-corrélation. Par conséquent, la méthode FTEE est capable de fournir l'information du mouvement fluide sur une dynamique plus étendue que la méthode FTC.

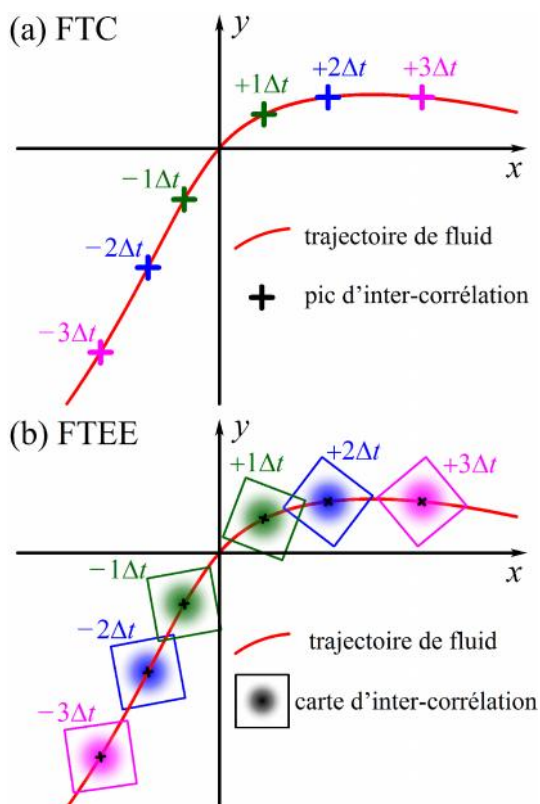


Figure 1 Schématisation des méthodes FTC et FTEE

2.2 Procédure pratique de la FTEE

Fondamentalement, la méthode FTEE est intégrée dans le procédé de traitement PIV classique qui utilise la technique de déformation d'image itérative [12, 13, 14]. Les images de particules sont déformées selon la trajectoire lissée $\mathbf{x}'(\mathbf{x}, n)$ dont chacun des point de la grille est filtré en utilisant les trajectoires voisines [15, 16, 17]:

$$I_n^{(\mathbf{x}, n)}(\mathbf{x}) = I_n(\mathbf{x} + \mathbf{x}'(\mathbf{x}, n)), \quad (2)$$

ici I_n et $I_n^{(\mathbf{x}, n)}$ désignent les images de particules originales et déformées respectivement. La carte de l'inter-corrélation à chaque pas de temps, R_n est ensuite calculée comme suit:

$$R_n(\Delta\mathbf{x}) = \int_{W_0} I_0(\mathbf{x}) I_n^{(\mathbf{x}, n)}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (3)$$

où W_0 est la fenêtre d'interrogation sur l'image de référence $I_0(\mathbf{x})$. Si $\mathbf{x}'(\mathbf{x}, n)$ est la trajectoire la plus appropriée, la valeur de la moyenne d'ensemble des signaux de corrélation a la valeur maximale lorsque $\Delta\mathbf{x} = 0$.

$$\frac{1}{2T} \sum_{n=-T}^{n=+T} R_n(\Delta\mathbf{x}) = \frac{1}{2T} \sum_{n=-T}^{n=+T} \int_{W_0} I_0(\mathbf{x}) I_n^{(\mathbf{x}, n)}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \quad (4)$$

Cependant, parce qu'il existe plusieurs biais dans les emplacements de pic dues non seulement à la solution approximée, mais aussi au bruit de mesure, la correction de chaque polynôme est nécessaire. Cela peut s'exprimer par l'introduction de la matrice Jacobienne du système d'image déformée [7, 8]:

$$R_k(\Delta\mathbf{a}_k) = \frac{1}{2T} \sum_{n=-T}^{n=+T} R_n(\mathbf{J}(\mathbf{x}'(\mathbf{x}, n))^{-1} \Delta\mathbf{a}_k n^k), \quad (5)$$

où R_k représente la carte de l'inter-corrélation pour la correction de $k^{\text{ième}}$ coefficient de polynôme, et \mathbf{J} peut s'exprimer comme:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}'(\mathbf{x}, n)) = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\mathbf{x}'_{+x} - \mathbf{x}'_{-x}}{2x} & \frac{\mathbf{x}'_{+x} - \mathbf{x}'_{-x}}{2y} & \frac{\mathbf{x}'_{+x} - \mathbf{x}'_{-x}}{2z} \\ \frac{\mathbf{x}'_{+y} - \mathbf{x}'_{-y}}{2x} & 1 + \frac{\mathbf{x}'_{+y} - \mathbf{x}'_{-y}}{2y} & \frac{\mathbf{x}'_{+y} - \mathbf{x}'_{-y}}{2z} \\ \frac{\mathbf{x}'_{+z} - \mathbf{x}'_{-z}}{2x} & \frac{\mathbf{x}'_{+z} - \mathbf{x}'_{-z}}{2y} & 1 + \frac{\mathbf{x}'_{+z} - \mathbf{x}'_{-z}}{2z} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

où \mathbf{x} dénote l'espacement de la grille, et \mathbf{x}'_{+x} et \mathbf{x}'_{-x} sont les trajectoires voisines correspondantes. La carte d'inter-corrélation de $R_k(\Delta\mathbf{a}_k)$ est construit en modifiant l'intervalle $\Delta\mathbf{a}_k$ pas à pas de l'origine à aux points voisins. La correction de chaque coefficient de polynôme est réalisée individuellement en suivant un ordre bas-haut-bas, qui s'appelle la correction cyclique en V [18], e.g. 1, 2... P, P-1... 2, 1.

2.3 Évaluation de la pression

Étant donné que les champs de vitesse (\mathbf{a}_1) et d'accélération matérielle instantanés ($2\mathbf{a}_2$) sont obtenus, le champ de gradient de pression correspondant peut être généré comme suit, dans des conditions d'écoulement incompressible:

$$\begin{aligned} \nabla p &= -\dots \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + -\nabla^2 \mathbf{u} \\ &= -\dots (2\mathbf{a}_2) + -\nabla^2 \mathbf{a}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

Le Laplacien est calculé par un schéma numérique de second ordre centré. Les gradients de pression sont alors inclus dans la procédure d'intégration spatiale itérative. La valeur de la pression à chaque point de la grille est itérativement renouvelée à partir du gradient de pression locale et de la pression tandis que l'état initial du champ de pression est supposé comme un champ de pression nulle.

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{\mathbf{i}}^{iter=0} = 0 \quad \forall \mathbf{i} \\ p_{\mathbf{i}}^{iter+1} = p_{\mathbf{i}}^{iter} + \frac{\sum_{d=1}^3 u_{\mathbf{i}} \left(\Delta x_d \frac{\partial p}{\partial x_d} \Big|_{x_d - \frac{1}{2}} - \Delta x_d \frac{\partial p}{\partial x_d} \Big|_{x_d + \frac{1}{2}} \right)}{\sum_{d=1}^3 u_{\mathbf{i}}} \end{array} \right. \quad (8)$$

avec $\mathbf{i} = \langle i, j, k \rangle^T$, $\mathbf{x} = \langle x, y, z \rangle^T$

et $\begin{cases} u_{f,g,h} = 1 & \text{si } \mathbf{i} \in D \\ u_{f,g,h} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$.

Ici *iter* indique le nombre d'itération actuel tandis *D* indique le domaine de calcul qui est généralement défini sur un repère Cartésien. Comme indiqué dans l'équation, le processus d'intégration ne considère pas l'extérieur du domaine *D*. Par conséquent, les conditions aux limite sont implicitement intégrées à la fois sur la surface de l'aile et sur le bord du domaine. L'évaluation du champ de pression dépend des valeurs locales des champs de vitesse et d'accélération. Cette dépendance implique la sensibilité aux erreurs locales, et leur propagation au cours du processus de calcul. Afin de limiter la propagation des erreurs lors de l'intégration, le domaine de calcul *D* est divisé en *N* sections tandis que chaque sous domaine *D_n*, *n*=1...*N*, dépend de la fiabilité de l'information locale. *D_N* représente le sous-domaine, dans lequel les informations sont considérées comme les plus fiables et situé là où l'écoulement est le moins perturbé. En revanche, le sous-domaine *D₀* contient les informations, qui devraient être les plus bruitées, et qui se situe généralement proche de l'aile. Le calcul de la pression de chaque point de la grille appartenant au sous-domaine *D_n* est effectué en excluant du calcul les sous-domaines tel que *k* < *n*. De cette manière la transmission des informations sur le domaine de l'intégration est effectuée uniquement à partir de *D_n* à *D_k*. Par exemple, le calcul du sous-domaine *D_N* est effectué sans le reste des sous-domaines. En outre, il est nécessaire qu'il existe une zone du bord pour chaque sous-domaine *D_n* avec un sous-domaine *D_{n+1}* afin de transmettre les informations à partir de *D_{n+1}* à *D_n*. Le coefficient *u_{f,g,h}* de l'algorithme de calcul de la pression pour un noeud au sous-domaine *D_n* est réécrit comme suit:

$$\begin{cases} u_{f,g,h} = 1, & \mathbf{i} \in D_k(t), k \geq n \\ u_{f,g,h} = 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

L'intégration est considérée comme convergée lorsque la variation moyenne de la valeur de la pression sur le maillage pour deux itérations successives est considérée comme négligeable.

3 Les expériences et les analyses de TR-PIV

3.1 2D2C TR-PIV



Figure 2: Images de l'écoulement autour d'un NACA0015 pour des mesures de TR-PIV 2D.

Une mesure résolue en temps de l'écoulement autour d'un profil d'aile NACA0015 de corde de 80mm avec un angle d'attaque fixé de 30 ° à un nombre de Reynolds de 10⁵ a été réalisée au moyen d'un laser Haute Cadence et d'une caméra rapide. La région mesurée est représentée sur la figure 2 [7, 8, 11]. La séquence d'image a été enregistrée à une fréquence de 1500 Hz avec une résolution de 1024 par 1024 pixels. Les fenêtres d'interrogation finales ont été définies de taille 32 par 32 pixels avec un chevauchement de 75% (espacement de 8 par 8 pixels entre chaque vecteur). Dans cette étude, 108 images successives, qui sont extraites d'un ensemble de 10 920 images, ont été analysées. La méthode FTEE a été appliquée sur 9 images successives avec le polynôme d'ordre 2.

3.2 3D3C Tomographie par balayage

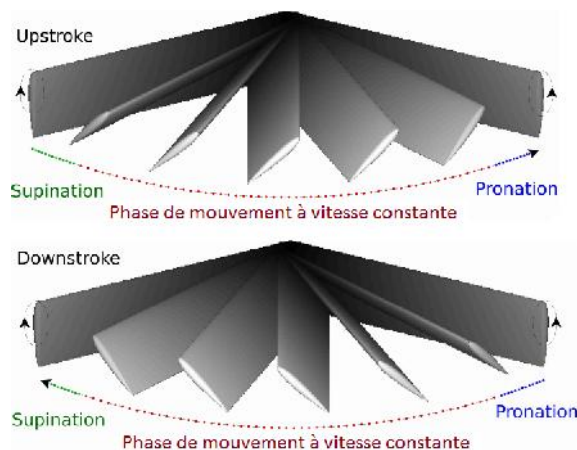


Figure 3 Représentation des différentes phases composant une période de battement

L'écoulement autour d'un profil d'aile NACA 0012 de corde 60mm en mouvement de battement et de révolution à un nombre de Reynolds de 1000 a été testé dans des conditions de mouvements symétriques comme le montre la figure 3 [9, 10]. Le volume a été illuminé à l'aide d'un système de laser qui est combiné avec un miroir oscillant. Le volume a

ensuite été discrétisé en 100 plans parallèles sur un intervalle de temps de 12,5 ms, ce qui correspond à la fréquence de l'impulsion laser de 8 kHz. Chaque plan de l'image a été enregistré par la caméra, qui est synchronisée avec le laser, avec une résolution de 1024 par 752 pixels. Cette technique de tomographie à balayage a été utilisée afin d'enregistrer cinq volumes successifs avec un intervalle de temps de 50 ms entre chaque volume. Les volumes des particules sont ensuite reconstruits en considérant la différence

d'échelle en raison de la profondeur du plan mesurée au moyen de l'interpolation bicubique. Comme résultat, des volumes de $972 \times 714 \times 100$ voxels, ce qui correspond à $227 \times 167 \times 83$ mm³ en taille réelle, ont été reconstruits. Dans cette étude, la séquence d'images a été analysée pour l'instant médian de la période du mouvement de l'aile. La méthode FTEE a été appliquée sur 5 volumes successifs avec le polynôme d'ordre 2.

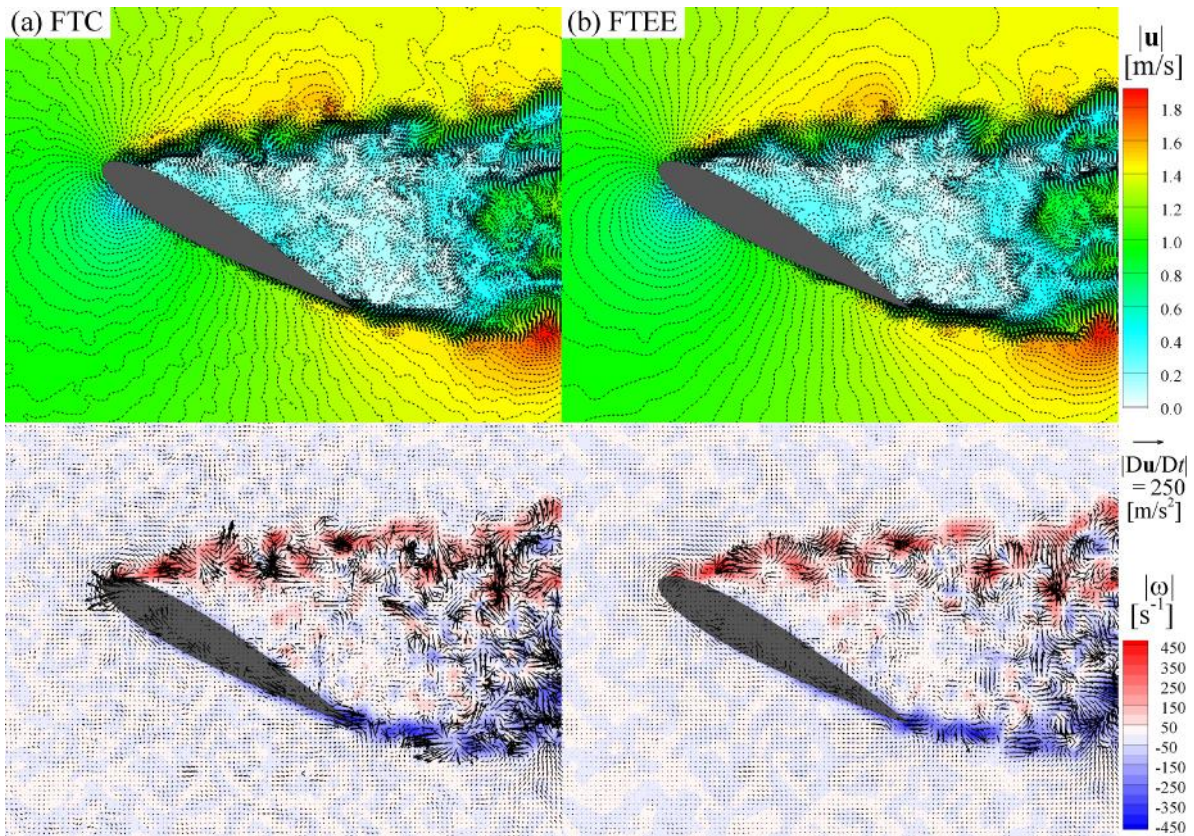


Figure 4 Champs instantanés de vitesse (en haut) et de l'accélération matérielle (en bas), (a) FTC, (b) FTEE

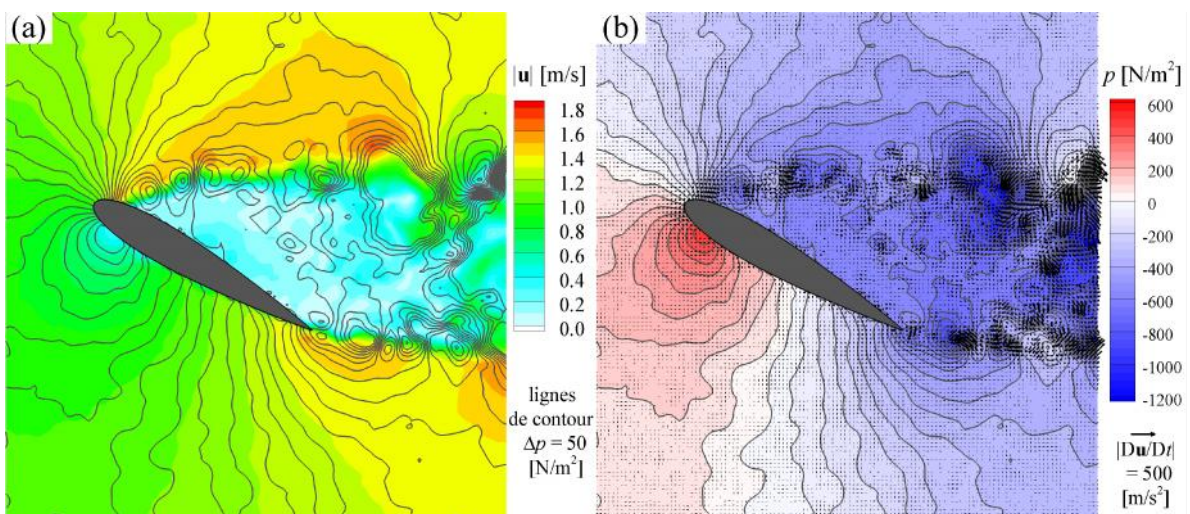


Figure 5 (a) Contour de champ de vitesse avec des lignes de contour de pression, (b) contour du champ de pression avec des vecteurs d'accélération matérielle

4 Résultats

Pour clarifier le potentiel et les limitations d'une telle méthode, aucun procédé de post-traitement tel que le filtrage ou le lissage n'est appliqué sur les champs de vitesse et pour l'évaluation de la pression.

4.1 Cas 2D2C

Les champs de vitesse et d'accélération matérielle instantanés des méthodes FTC et FTEE sont montrés dans la figure 4, respectivement. Comme cela a été mentionné au début de la section 2, la méthode FTEE montre des résultats améliorés tout en réduisant la fluctuation aléatoire due au bruit de mesure. Par conséquent, seuls les résultats de la FTEE ont été pris en compte dans les analyses à venir.

La figure 5 illustre les résultats de l'évaluation de la pression. Par contraste avec le champ de pression à l'extérieur de la région de sillage qui montre des contours lisses comme les contours de vitesse, à la fois la pression et l'accélération matérielle dans la zone de sillage montrent des résultats bruités. La principale raison est le mouvement hors du plan en raison de la structure tridimensionnelle de l'écoulement, et de ce fait, l'analyse en 2D en utilisant plusieurs images ne peut pas évaluer le mouvement du fluide à travers les images dans le temps. En outre, l'accélération matérielle est significativement affectée par le bruit de mesure en raison de son amplitude et de sa nature différentielle.

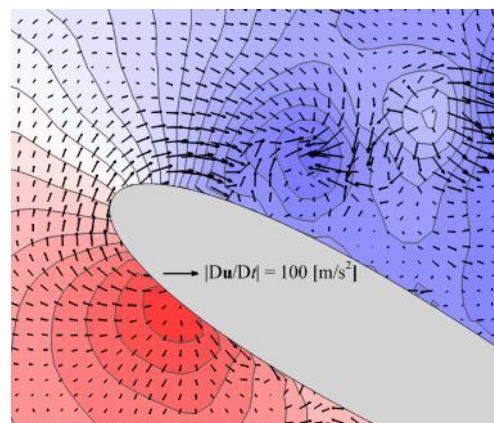


Figure 6 Image zoomée de la figure 4b au bord d'attaque

La figure 6 montre la zone zoomée près du bord d'attaque. Parce que le mouvement hors du plan est minimisé par la couche visqueuse de cisaillement près du bord d'attaque, l'accélération matérielle montre un résultat plus clair et plus fiable en comparaison avec les vecteurs de la région de sillage. La pression est mesurée comme maximale au point de stagnation où l'accélération matérielle et la vitesse sont nulles.

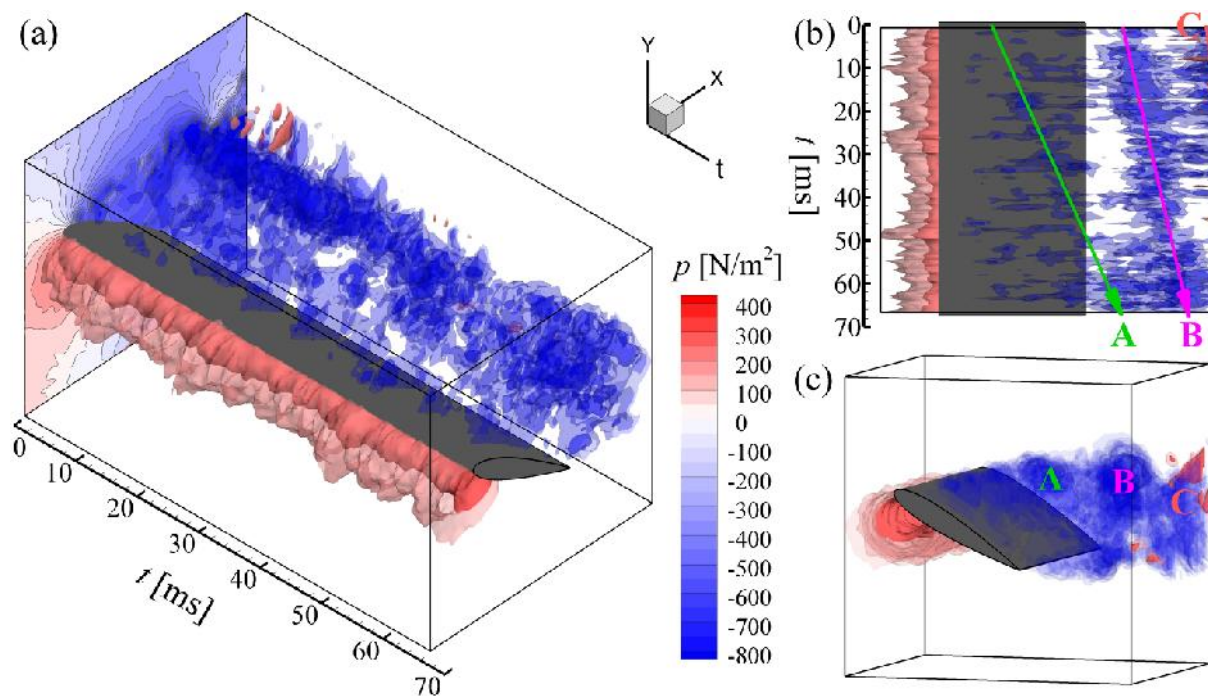


Figure 7 Evolution temporelle du champ de pression (a) vue d'ensemble, (b, c) mouvements de structures de l'écoulement; iso-surfaces $p = -950, -750, 200$ et 300 N/m^2 , respectivement.

L'évolution temporelle du champ de pression est illustrée sur la figure 7 où 100 champs sont présentés. La valeur de la pression moyenne du sous-domaine, dont le champ de l'écoulement est la plus stable, et

sélectionnée en tant que la pression de référence. Cependant, la fluctuation de la pression dans le temps est significative. Cela implique que, non seulement la zone de sillage, mais aussi la région stable sont affectées par le bruit de mesure mais

surtout par la turbulence. Néanmoins, les mouvements de la structure de l'écoulement derrière l'aile sont bien observés comme en témoigne les régions de pression négative. La vitesse de déplacement des régions de pression négative, qui sont indiquées par A, B et C dans la figure 7b, est ralentie lorsque les structures sont éloignées du point de formation, qui est le bord d'attaque.

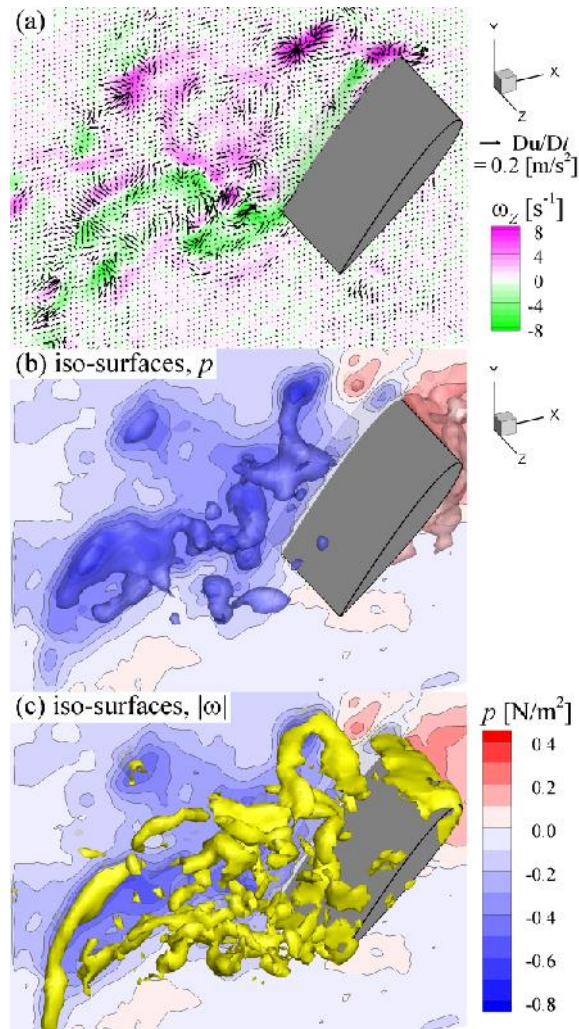


Figure 8 Résultats de mesures 3D3C, (a) contour de la composante de vorticité selon z avec les vecteurs d'accélération matérielle, (b) iso-surfaces de pression à $p = -0,7, -0,5$ et $+0,2$ N/m^2 , (c) iso-surfaces de la vorticité $|\omega| = 7$ s^{-1} et pression instantanée.

4.2 Cas 3D3C

La figure 8 montre les résultats de l'accélération, de la pression et de la vorticité à partir de la mesure des vitesses 3D3C de l'écoulement. En dépit d'un écoulement de sillage plus complexe, l'accélération matérielle montre des résultats moins fluctuants comparativement au cas 2D. Et de ce fait, le champ de pression correspondant montre des structures tourbillonnaires clairement définies dans la région de sillage. Loin de l'aile, un tourbillon intense et de forme allongée ainsi qu'une zone correspondant à

une basse pression sont observés. Cette dépression semble générée à partir du bout de l'aile en raison du mouvement de révolution de l'aile. Avec des mesures en 3D, le mouvement hors du plan, n'affecte pas la méthode FTEE qui permet alors de suivre tous les parcelles de fluide sans perte, et de ce fait tend à montrer des résultats plus fiables.

5 Conclusion

En préalable à la détermination de champs de pression, les champs de vitesse et d'accélération matérielle sont obtenus sur une dynamique étendue par l'évaluation de trajectoires fluides basée sur une moyenne d'ensemble des inter-corrélations d'images successives (FTEE). Des mesures résolues en temps en 2D et 3D ont été réalisées afin d'étudier les améliorations et les limites de l'évaluation du champ de pression instantanée. Les résultats de l'expérience en 2D ont montré les champs d'accélération matérielle et de pression biaisés en raison du mouvement hors du plan et de la turbulence de l'écoulement. D'autre part, la possibilité de surmonter ces problèmes en utilisant plusieurs images successives est validée mais reste limitée en cas de non-respect de la divergence sur le champ fluide. Les résultats de l'expérience autour d'un écoulement 3D sont apparus plus fiables et en bon accord avec les structures tourbillonnaires tout en supprimant le bruit de mesure.

6 Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet NIOPLEX (Non-intrusive Optical Pressure and Loads Extraction for Aerodynamic Analysis), financé par le programme de la Commission européenne FP7, grant n°60551.

7 References

- [1] Van Oudheusden B.W., PIV-based pressure measurement. *Measurement Science and Technology* 24:032001 (2013)
- [2] Hain R., Kähler C.J., Tropea C., Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. *Experiments in fluids* 42:403-411 (2007)
- [3] Stanislas M., Okamoto K., Kähler C.J., Westerweel J., Main results of the second international PIV challenge. *Experiments in fluids* 39:170-191 (2005)
- [4] Hain R., Kähler C.J., Fundamentals of multiframe particle image velocimetry (PIV), *Experiments in fluids* 42(4):575-587 (2007)
- [5] Sciacchitano A., Scarano F., Wieneke B., Multi-frame pyramid correlation for time-resolved PIV, *Experiments in fluids* 53(4):1087-1105 (2012)
- [6] Lynch K., Scarano F., A high-order time-accurate interrogation method for time-resolved PIV. *Measurement Science and Technology*, 24(3):035305 (2013)
- [7] Jeon Y.J., Chatellier L., David L., Evaluation of fluid trajectory in time-resolved PIV, *10th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV13)*, 2-4 July, Delft, Netherlands, 2013

- [8] Jeon Y.J., Chatellier L., David L., Fluid trajectory evaluation based on an ensemble-averaged cross-correlation in time-resolved PIV, *Experiments in Fluids*, Revision (2014)
- [9] David L., Jardin T., Braud P., Farcy A., Time-resolved scanning tomography PIV measurements around a flapping wing, *Experiments in fluids* 52(4):857-864 (2012)
- [10] Tronchin T., David L., Farcy A., Loads and pressure evaluation of the flow around a flapping wing, *10th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV13)*, 2-4 July, Delft, Netherlands, 2013
- [11] Chatellier L., Jeon Y.J., Braud P., Parent V., David L., Assessment of the statistical relevance of TR-PIV datasets. *10th International Symposium on Particle Image Velocimetry (PIV13)*, 2-4 July, Delft, Netherlands, 2013
- [12] Huang H.T., Fiedler H.E., Wang J.J., Limitation and improvement of PIV, *Experiments in fluids* 15:263-273 (1993)
- [13] Jambunathan K., Ju X.Y., Dobbins B.N., Ashforth-Frost S., An improved cross correlation technique for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology* 6:507 (1995).
- [14] Scarano F., Riethmuller M.L., Advances in iterative multigrid PIV image processing. *Experiments in fluids* 29:S051-S060 (2000)
- [15] Nogueira J., Lecuona A., Rodriguez P.A., Local field correction PIV: on the increase of accuracy of digital PIV systems. *Experiments in fluids* 27:107-116 (1999)
- [16] Lecuona A., Nogueira J., Rodríguez P., Santana D., Accuracy and time performance of different schemes of the local field correction PIV technique. *Experiments in fluids* 33:743-751 (2002)
- [17] Schrijer F.F.J., Scarano F., Effect of predictor-corrector filtering on the stability and spatial resolution of iterative PIV interrogation. *Experiments in fluids* 45: 927-941 (2008)
- [18] Braess D., Hackbusch W., A new convergence proof for the multigrid method including the V-cycle. *SIAM Journal on Numerical Analysis*. 20:967-975 (1983)