



HAL
open science

Enregistrement multi-angulaire sur une caméra pour les mesures 3D dans les écoulements

Corine Lacour, Petra Daher, Bertrand Lecordier

► **To cite this version:**

Corine Lacour, Petra Daher, Bertrand Lecordier. Enregistrement multi-angulaire sur une caméra pour les mesures 3D dans les écoulements. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097651

HAL Id: hal-02097651

<https://hal.science/hal-02097651>

Submitted on 12 Apr 2019

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.

Enregistrement multi-angulaire sur une caméra pour les mesures 3D dans les écoulements

Corine LACOUR¹, Petra DAHER¹, Bertrand LECORDIER¹

¹Normandie Université, UNIROUEN, INSA Rouen, CNRS, CORIA, 76000 Rouen, France

Email auteur correspondant : bertrand.lecordier@coria.fr

Les approches de mesures 3D sont utilisées de plus en plus fréquemment en mécanique des fluides, que ce soit pour mesurer la vitesse, la position d'une surface (vibration, interface gaz liquide) ou un champ scalaire (émission de flamme, LIF 3D, densité...). En pratique elles consistent à observer la zone d'intérêt sous différents angles avant de réaliser une reconstruction volumique, le nombre d'angles d'observation devant souvent être supérieur à trois. Cela conduit à complexifier notablement le montage optique et induit des coûts importants (caméras, objectifs...). Pour la reconstruction de surface, il est dans certain cas possible de considérer des approches où plusieurs angles de vue sont enregistrés sur le même détecteur. Dans ce travail nous proposons ce type de dispositif en plaçant devant l'objectif un système optique à huit miroirs projetant quatre angles d'observation sur des zones distinctes d'un même capteur. Pour la localisation de surface, en utilisant la technique des "mouchetés", nous validons cette approche d'enregistrement sur quatre exemples différents nous servant à évaluer la précision de reconstruction de la surface et montrer ses potentiels pour l'étude des interactions fluide/structure.

1 Introduction

Les approches de mesures tridimensionnelles sont utilisées de plus en plus fréquemment en mécanique des fluides, que ce soit pour mesurer la vitesse [1], la position d'une surface (vibration, interface gaz liquide) [2, 3] ou un champ scalaire (émission de flamme, LIF 3D, densité...) [4]. Elles consistent généralement à observer la grandeur à étudier sous différents angles de vue, puis à remonter à sa distribution 3D à l'aide d'une reconstruction volumique entièrement numérique. Si ce type d'approche est utilisé depuis des années dans des domaines tel que la médecine (scanner, IRM), leur application en mécanique des fluides est beaucoup plus récente. Cela s'explique par le fait que dans les écoulements, la grandeur à observer évolue souvent temporellement et donc impose une acquisition simultanée des différents angles de vue et non séquentielle. Il en résulte un faible nombre d'angles d'observation lié à la difficulté d'agencer les détecteurs autour de l'expérience et aux coûts qu'engendre chaque nouveau détecteur. En pratique, le nombre d'angles d'observation est souvent inférieur à 6, ce qui complexifie notablement la reconstruction 3D. Lorsque la résolution spatiale n'est pas critique, il est alors possible de considérer des approches où plusieurs angles de vue sont enregistrés sur le même détecteur [5]. Pour cela, un dispositif optique est placé devant l'objectif pour projeter les différents angles d'observation sur des zones distinctes d'un même capteur. En dehors de réduire le coût du dispositif d'enregistrement, cela permet également d'utiliser une caméra spécifique (intensifiée, haute cadence) sans en multiplier le nombre.

Dans ce travail, nous proposons un montage optique placé devant l'objectif d'une caméra haute cadence et permettant de regarder un objet sous 4 angles de vue distincts. Afin d'étudier la localisation d'objet en 3D, nous avons opté pour la méthode du "moucheté" qui consiste noircir les surfaces et à peindre des points blancs en faible densité. Ces points sont les marqueurs de la surface et sont utilisés lors de la reconstruction 3D de la surface. Afin de valider cette approche, dans ce travail nous présentons plusieurs exemples d'application permettant la caractérisation de la précision de la localisation de la surface, mais également d'évaluer le potentiel de ce dispositif mono-caméra pour étudier la vibration de la surface d'un objet. Dans ce papier, nous débiterons par la présentation du montage optique et de la méthode d'analyse pour la reconstruction de la surface, puis nous présenterons 4 exemples d'application de reconstruction de surface.

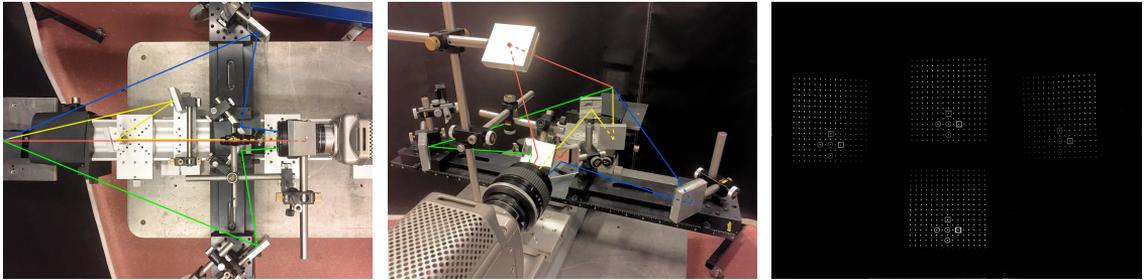


Figure 1: Dispositif d'enregistrement multi-angle et image d'une mire de calibration

2 Présentation du montage expérimental

Dans un premier temps nous allons présenter le dispositif d'enregistrement permettant l'enregistrement multi-angulaire sur un détecteur avant de décrire dans une seconde section le traitement effectué sur les images pour la calibration volumique et la reconstruction de surface.

2.1 Montage optique

Dans ce travail nous proposons d'enregistrer sur un même détecteur haute cadence (Phantom V10 2400 x 1800 pixels 10 bits à 1000 images/s) un ensemble de vue angulaire d'une même scène grâce à un agencement de huit miroirs.

L'ensemble du dispositif de séparation et d'acquisition placé devant un objectif de 85 mm est présenté sur la figure 1, où les différents chemins optiques de collection sont schématisés par des lignes de couleurs. Ce séparateur optique enregistre sur le capteur dans cette configuration, 4 vues angulaires totalement dissociées. Pour chaque direction d'enregistrement, deux miroirs fixent l'angle d'observation et compensent les différences de chemin optique pour assurer la netteté de l'image sur le détecteur. Sur la figure 1 à droite est présentée l'image enregistrée sous les 4 angles d'observations d'une mire d'étalonnage plane positionnée au centre du volume d'étude. Sur ces quatre vues, les différences de déformation de la mire régulière montrent l'effet de l'enregistrement sous les différents angles d'observation.

2.2 Traitement des données

Pour la localisation les points des "mouchetés" peints sur les surfaces, plusieurs étapes sont nécessaires. L'étape de calibration des caméras est réalisée en déplaçant sur l'intégralité du volume d'étude, une mire de point à l'aide d'une translation motorisée. Pour chacune des positions de la mire suivant l'axe z , la localisation des points sur toutes les vues est extraite à l'aide d'une corrélation de motif offrant une résolution "sub-pixel". Ces résultats servent à déterminer les paramètres du modèle polynomial pour les caméras. Ce modèle, d'ordre plus élevé que le modèle Soloff classiquement retenu (3, 3 et 2 respectivement suivant x , y et z) permet de prendre en compte les effets de distorsion de l'imagerie et donne accès à des reconstructions sur des volumes épais nécessaires à l'étude des phénomènes vibratoires de grande amplitude. Dans cette étude, pour la calibration 3D du dispositif, 21 plans sont enregistrés et permettent une reconstruction sur une profondeur de champ de plus de 50 mm.

Pour la reconstruction de la surface, un pré-traitement des images est réalisé pour ne conserver que le signal des motifs du moucheté avant d'appliquer une reconstruction de type MLOS. La position (x_i, y_i, z_i) des particules p_i dans le volume est ensuite déterminée par une approche de détection volumique par seuillage et localisation de l'intensité médiane. Afin de limiter l'introduction de particule fantôme, une étape de validation de chaque particule p_i est réalisée par une projection inverse sur les images afin de valider la présence du signal d'un point du moucheté dans la zone considérée. La particule extraite est validée si le signal est présent avec une faible tolérance de positionnement sur les 4 vues. Dans notre cas, ce type de reconstruction volumique très simple est possible car la densité des points blancs sur les surfaces est relativement faible. L'intégralité de la procédure de reconstruction volumique et d'extraction de la position des points p_i a été optimisée en conservant entre chaque calcul le maximum

d'information redondante et en parallélisant les codes développés au CORIA. Le temps pour la reconstruction d'un volume et l'extraction de la surface à partir de 4 vues est de l'ordre de 1 à 2 secondes sur un portable de dernière génération (Intel Core i7 2,7 Ghz 4 cœurs).

3 Résultats expérimentaux

Afin de valider le système d'acquisition 3D et de reconstruction de surface, nous proposons 4 situations d'enregistrement différentes :

- Translation d'un plan suivant z
- Reconstruction de la surface de cylindres calibrés
- Enregistrement de la vibration d'une plaque souple dans un écoulement
- Reconstruction du déplacement d'une pale de ventilateur en rotation

Les deux premières sont utilisées pour évaluer la précision de reconstruction dans des configurations calibrées, alors que les deux suivantes permettent d'illustrer dans une situation réelle, les potentiels de cette approche pour la reconstruction d'une surface mobile.

3.1 Translation d'un plan suivant z

La première expérience consiste à traduire un plan rigide suivant la direction de l'axe optique de la caméra (axe z). Pour la reconstruction, la face caméra est noircie et mouchetée de points blancs et fixée sur une platine de translation motorisée ayant une précision de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ (Figure 2). Pour l'expérience, le plan parcourt l'intégralité du volume de calibration entre $z = -45$ et $z = 15 \text{ mm}$ par pas de $0,5 \text{ mm}$. Les enregistrements sont réalisés en lumière blanche continue avec une durée d'intégration de 100 ms sur la caméra.

Sur la figure 3 (gauche) nous présentons l'extraction des points du moucheté à partir des clichés de 14 plans en utilisant la procédure d'écrite précédemment. La couleur des points dans cette représentation code la position en z des mesures 3D. Nous notons une très bonne séparation des plans avec une très faible dispersion en z des points reconstruits sur chacun des plans. En utilisant une interpolation sur un maillage régulier, nous obtenons un positionnement des plans avec une grande précision (figure 3). Pour évaluer la précision de reconstruction des plans, à partir des volumes reconstruits, nous avons tracé sur la figure 4 les profils d'intensités en intégrant l'intensité dans

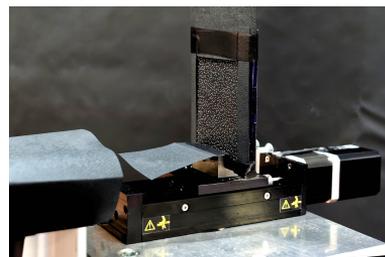


Figure 2: dispositif de translation du plan suivant l'axe optique z

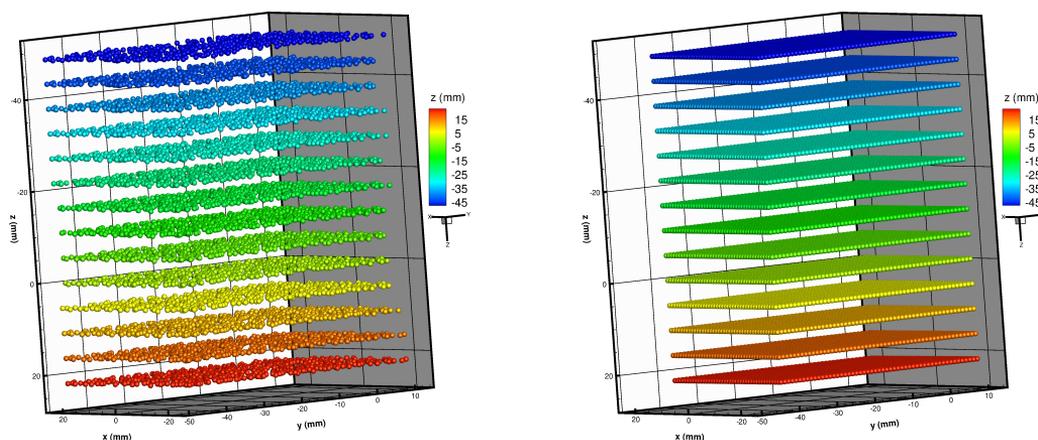


Figure 3: Reconstruction des plans (gauche) et interpolation sur un maillage régulier (droite)

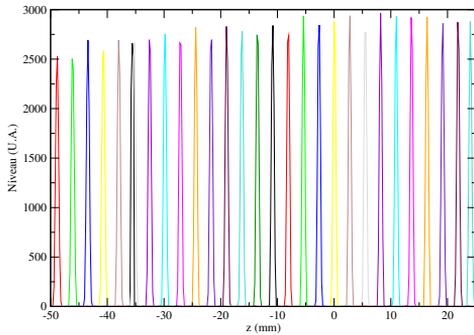


Figure 4: Intensité projetée des volumes reconstruits suivant x/y sur le domaine d'étude

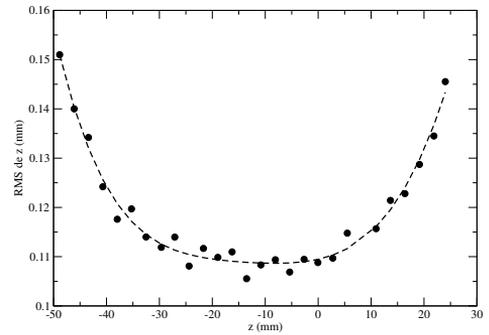


Figure 5: Dispersion de la localisation des points (x_i, y_i, z_i) en z en fonction des plans

les volumes suivant les directions x et y . Chaque profil correspond à un volume et donc une position du plan. Nous constatons que les profils d'intensité sont très faiblement dispersés ce qui indique un positionnement précis de l'intensité des points reconstruits dans les volumes. Pour une évaluation quantitative de la précision de positionnement des plans, à partir des coordonnées (x_i, y_i, z_i) des points p_i extraits dans les volumes, nous avons calculé pour chacune des positions du plan les RMS des positions z_i . Ces résultats sont reportés sur la figure 5 pour chacun des plans en fonction de z . La dispersion la plus faible se trouve naturellement au centre de la zone de calibration, correspondant au plan de "meilleure" mise au point. Plus l'on s'éloigne de cette position centrale et plus la dispersion de positionnement des points en z augmente. Cela s'explique principalement par une augmentation de la dimension de l'image des points du moucheté sur les images plus le plan est en défaut de mise au point. Nous notons néanmoins que pour une plage de z couvrant de -30 à 10 mm que la dispersion est légèrement supérieure à $100 \mu\text{m}$ mais est pratiquement constante et indique ainsi une profondeur de champ importante permettant un débattement significatif dans la détection de l'objet. Néanmoins, par rapport à la précision que nous attendions dans cette configuration de grandissement, nous avons une valeur réduite d'un facteur d'environ 2. Nous estimons que la précision évaluée dans ce travail peut être entachée par un léger désalignement du plan qui tendrait à augmenter la RMS ($z \cong \text{constant}$), mais également un pas de reconstruction volumique (*voxel*) de $100 \mu\text{m}$ certainement trop important par rapport à la précision attendue. Dans des travaux futurs, ces deux aspects seront considérés afin de réaliser une estimation de la précision maximale que nous pouvons escompter avec ce dispositif.

3.2 Reconstruction de cylindres de différents diamètres



Figure 6: Photo des quatre cylindres de référence

Pour évaluer la précision de reconstruction de surface par une deuxième approche, nous avons utilisé 4 cylindres de différent diamètre ($R = 10.10, 20.25, 30.30$ et 35.08 mm) que nous avons mouchetés avec des points blancs sur un fond noir (Figure 6). Ces cylindres ont été positionnés successivement au centre du volume de mesure et éclairés en lumière blanche continue comme pour le cas précédent.

L'extraction des points de la surface du cylindre $R = 30.30$ mm est présentée à gauche sur la figure 7. Nous constatons une extraction des points satisfaisante sur une profondeur de champ importante avec une bonne homogénéité des positionnements des points en z le long de l'axe du cylindre. Ce dernier point est confirmé sur la figure de droite où nous représentons les lignes d'iso-hauteur sur

l'intégralité de la zone reconstruite. Comme nous l'expectons, ces dernières sont parfaitement alignées suivant l'axe du cylindre quelle que soit la position en z considérée.

La dernière validation de reconstruction à partir des cylindres consiste à comparer le diamètre mesuré avec le diamètre réel des cylindres. Ces résultats sont présentés sur la figure 8 où dans le plan X/Z nous avons reporté les points extraits pour tous les z dans les différents cas superposés aux rayons des

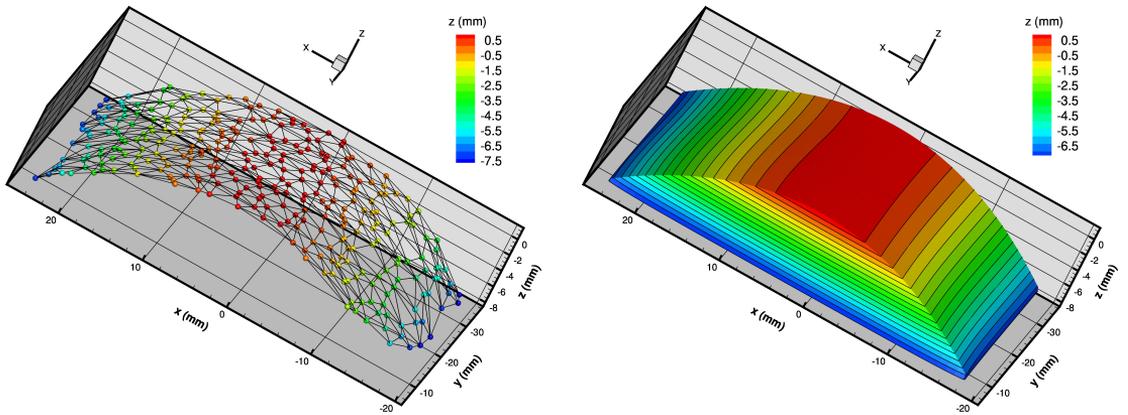


Figure 7: Extraction des 3D des points du cylindre de rayon $R = 30,30$ cm (à gauche) et reconstruction polynomiale de la surface (droite)

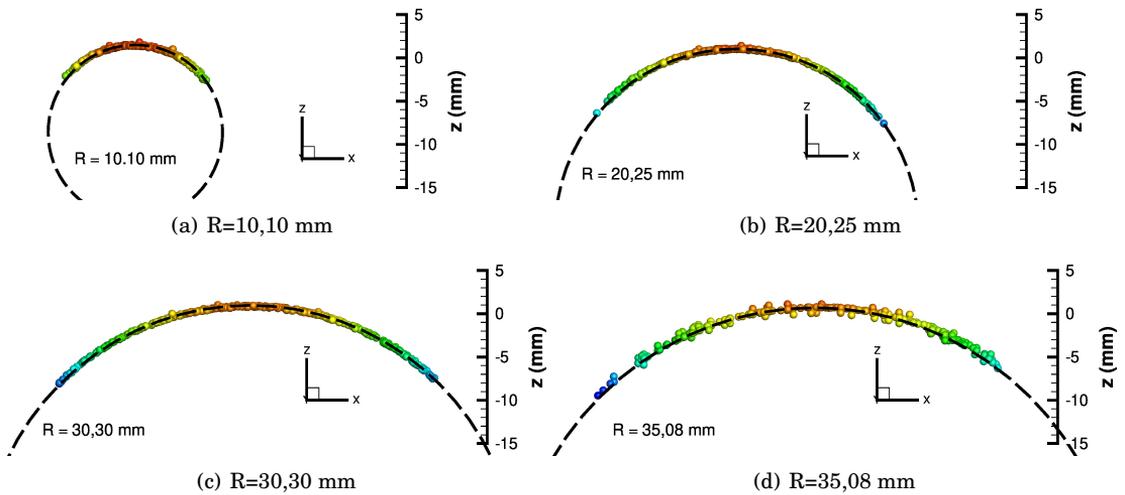


Figure 8: Comparaison dans le plan X/Z pour les quatre cylindres de l'extraction des points avec le cylindre "théorique"

cylindres (pointillés). Pour tous les rayons, nous notons une excellente concordance entre la mesure et le positionnement "théorique" de la surface des cylindres. Pour les trois premiers cylindres, les points extraits se superposent parfaitement avec le cercle. Pour le cylindre de plus grande dimension, une légère augmentation de la dispersion est notée, mais que nous pensons pouvoir expliquer par un moucheté différent et en particulier moins dense et moins contrasté que pour les trois autres cylindres (Figure 6). Pour les 4 cas analysés, la reconstruction s'effectue sur environ 10 mm de profondeur car les points au-delà de ces positions ne peuvent pas être observés suivant les quatre angles de vue, critère imposé dans la reconstruction et l'extraction des points du moucheté.

3.3 Oscillation d'une plaque souple sous l'impact d'un jet d'air

Le premier exemple d'application de notre méthode d'enregistrement est celui d'une plaque souple en caoutchouc placée devant un jet d'air (Figure 10). La plaque est fixée par l'une de ses extrémités et sous l'effet de l'impulsion du fluide sur sa face arrière, la plaque oscille. Les enregistrements ont été réalisés en éclairant la plaque à l'aide d'un laser Nd:YAG délivrant des doubles impulsions de 30 mJ à une fréquence de 20 Hz. Pour obtenir un éclairage homogène sur l'intégralité de la surface de la plaque, nous avons utilisé un diffuseur.

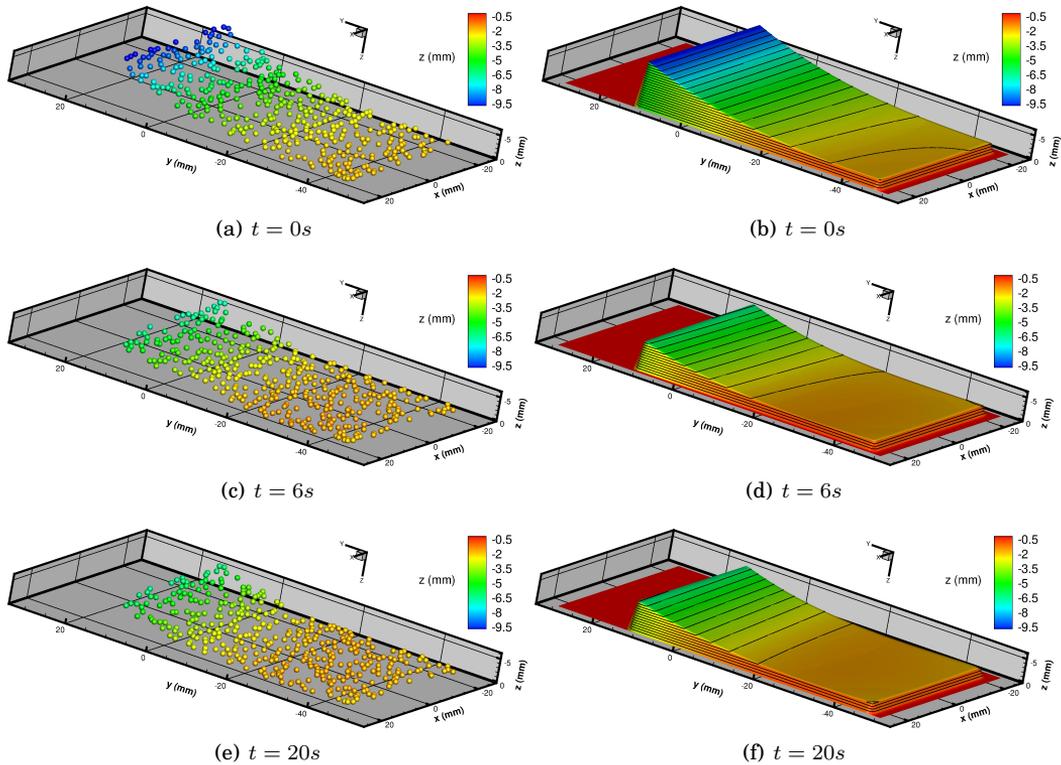


Figure 9: Extraction des points de la plaque pour 3 instants (gauche) et reconstruction polynomiale de la surface (droite)

Les premiers résultats pour 3 instants sont présentés sur la figure 9. Sur la partie de gauche, nous avons tracé la position (x_i, y_i, z_i) des points p_i du moucheté extraits à partir des enregistrements. Ces points sont difficilement exploitables directement, variant en position mais également légèrement en nombre au cours du temps suivant les critères d'extraction et la position de la plaque. Pour une exploitation quantitative de ces mesures nous avons extrait une surface à l'aide de polynôme 2D pour accéder à la position en z de la surface en fonction des coordonnées (x, y) sur la plaque et du temps.



Figure 10: Plaque souple en caoutchouc

Nous observons les oscillations de la plaque souple avec l'écoulement et cela malgré un échantillonnage en temps un peu faible pour suivre les déformations les plus rapides. Après 20 seconde, l'écoulement est stoppé et nous constatons un arrêt complet des vibrations du point de la plaque correspondant à une position de repos $z = -6.1 \text{ mm}$. A partir de cette expérience simple, nous illustrons l'intérêt de notre approche pour étudier avec précision le mouvement et la déformation d'une structure en interaction avec un écoulement.

Les résultats de l'interpolation de la surface sont présentés sur la figure 9 à droite. Sur ces graphiques la couleur code la hauteur de la plaque en z . L'oscillation de la plaque au cours du temps s'observe clairement pour les 3 instants reportés et la courbure des lignes d'iso-hauteur permet de mettre en évidence la torsion de la plaque sous l'effet du jet d'air.

Pour illustrer les potentiels de cette approche pour l'étude des interactions fluide/structure, sur la figure 11, nous avons tracé l'évolution temporelle du point de la plaque de coordonnée $(-10,10)$.

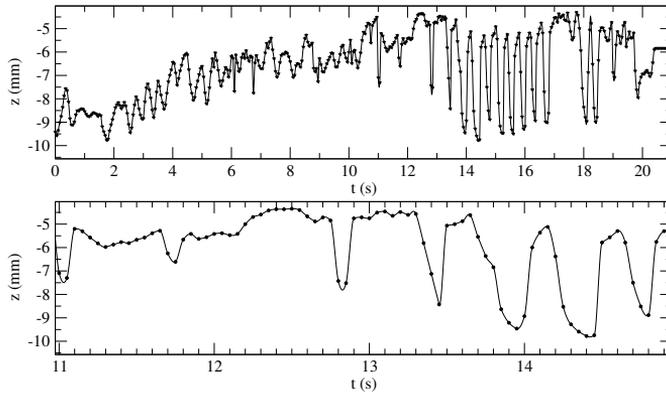


Figure 11: Evolution temporelle du point de la pale (-10,10)

3.4 Reconstruction d'un pale de ventilateur en rotation

Pour la dernière illustration de reconstruction de surface, nous avons appliqué la méthode au cas d'une pale de ventilateur en rotation (Figure 12). Un ventilateur de type refroidissement d'ordinateur a été placé dans la zone d'observation et mis en rotation à 3000 tr/min . La mise en phase de l'acquisition (laser/caméra) a été réalisée à partir du signal tachymètre du ventilateur. Afin de visualiser la surface, deux pales ont été noircies et mouchetées à l'aide de peinture blanche et éclairées par un laser Nd:YAG double impulsion.

La première reconstruction est présentée sous deux angles de vue sur la Figure 13. Pour visualiser la surface, nous avons créé un maillage par triangularisation à partir des points 3D bruts (x_i, y_i, z_i) mesurés. Nous distinguons ainsi clairement la partie pale de celle du rotor, la surface entre les deux n'étant pas reconstruite car trop proche en orientation des axes d'observation. Nous pouvons noter la très bonne reconstruction du profil de la pale ainsi que la planéité du rotor central (figure de gauche). Sur la vue de droite, la qualité de la reconstruction des surfaces est confirmée par la régularité des lignes d'iso-contour de couleur codant la hauteur mesurée. Dans ce travail nous ne présentons pas l'analyse des enregistrements faits par les deux impulsions laser

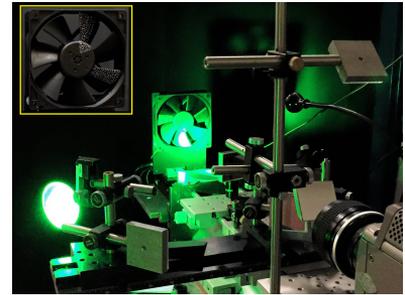
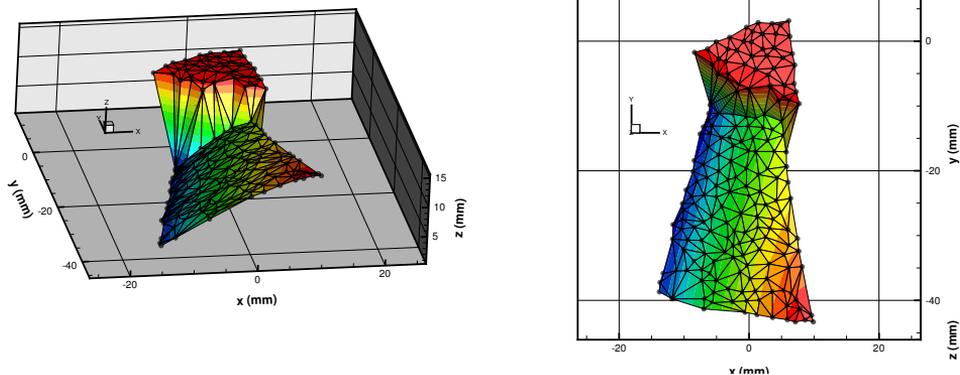


Figure 12: Photo du ventilateur

Figure 13: Exemple de reconstruction d'une pale du ventilateur en rotation à 3000 tr/min

et permettant d'obtenir la vitesse instantanée de la pale. Nous reportons juste sur la figure 14 un exemple de la reconstruction de la pale à différentes phases de la rotation. Dans la suite de ce travail, ayant l'information de vitesse de la pale en fonction de la phase, il sera possible d'étudier les phénomènes vibratoires dans ce type de dispositif, lui adjoignant le cas échéant une mesure de vitesse par PIV pour corréler la vibration avec la vitesse du fluide à proximité du ventilateur.

4 Conclusions et perspectives

Dans cet article nous avons présenté un montage optique permettant d'enregistrer sur un détecteur unique haute cadence (1000 images/s), 4 vues angulaires d'une même scène à l'aide d'un agencement de huit miroirs plans. Ce dispositif d'enregistrement haute cadence a été utilisé pour reconstruire et localiser en 3D la surface d'objets fixes ou en mouvement. A partir de 4 exemples d'application (plan, cylindre, plaque souple et ventilateur), nous avons pu montrer les potentiels de cette approche mono-caméra pour la reconstruction de surface et également évaluer la précision à $100\ \mu\text{m}$ pour son positionnement en profondeur.

Ce dispositif est adapté à la mesure de vibration (oscillation) de surface de grande amplitude grâce à une profondeur de champ importante ($40\ \text{mm}$). Ce dispositif, facile à associer à une mesure de vitesse de type PIV (2D-2C, 2D-3C ou 3D) est particulièrement adapté pour les études d'aéro/élasticité (interactions fluide/structure).

Il est possible également d'envisager une application de cette approche pour les mesures de tomographie PIV dans le cas où les volumes à étudier sont de faible dimension et où la résolution spatiale de la mesure de vitesse n'est pas le critère prépondérant. Une validation du dispositif pour la mesure de vitesse sera réalisée dans les mois à venir.

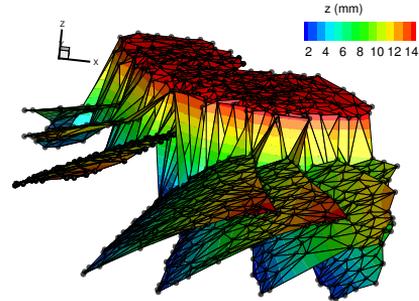


Figure 14: Superposition de la reconstruction d'une pale à différentes phases

References

- [1] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke, and B. W. van Oudheusden. Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, V41(6):933–947, December 2006.
- [2] Guillaume Gomit. *Développement de techniques de mesure de surfaces libres par moyens optiques : application à l'analyse de l'écoulement généré par un modèle de bateau en bassin des carènes*. PhD thesis, Ecole doctorale : Sciences et ingénierie en matériaux, mécanique, énergétique et aéronautique - SIMMEA (Poitiers), 2013.
- [3] Guillaume Gomit, Damien Calluau, Ludovic Chatellier, Laurent David, D Fréchou, R Boucheron, O Perelman, and C Hubert. Développement d'un dispositif de mesure de champ de vagues stationnaire en bassin des carènes par technique de stéréovision. In *14e Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2014 - Marseille 2014*, 09 2014.
- [4] TD Upton, DD Verhoeven, and DE Hudgins. High-resolution computed tomography of a turbulent reacting flow. *Experiments in Fluids*, 50(1):125–134, 2011.
- [5] Bing Pan, LiPing Yu, and QianBing Zhang. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3d shape and deformation measurement. *Science China Technological Sciences*, September 2017.