



HAL
open science

PTV 3D3C haute cadence autour d'un cylindre dans une maquette industrielle de carte de guidage

Vincent Fichet, Thierry Muller, Laurent Zimmer

► **To cite this version:**

Vincent Fichet, Thierry Muller, Laurent Zimmer. PTV 3D3C haute cadence autour d'un cylindre dans une maquette industrielle de carte de guidage. L. Zimmer ed. Recueil des actes du 16e Congrès Francophone de Techniques Laser pour la Mécanique des Fluides., Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, pp 269–276., 2018, 979–10–699–2816–9. hal-01947329

HAL Id: hal-01947329

<https://hal.science/hal-01947329v1>

Submitted on 6 Dec 2018

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.

PTV 3D3C haute cadence autour d'un cylindre dans une maquette industrielle de carte de guidage.

Vincent Fichet¹, Thierry Muller¹, Laurent Zimmer²

¹Centre technique Framatome, 30 boulevard de l'industrie, 71200 Le Creusot

²Laboratoire EM2C, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, 3 rue Joliot Curie 91192 Gif-sur-Yvette

Email auteur correspondant : vincent.fichet@framatome.com

Les travaux présentés dans cet article portent sur des mesures 3D3C de vitesse d'écoulement à une caméra autour d'une carte de guidage dans le but de comprendre les efforts induits sur les crayons de grappe de contrôle. Ces efforts hydrauliques excitent les crayons de grappe qui vibrent et peuvent user peu à peu leur guidage, pouvant conduire à leur remplacement lors d'opérations de maintenance. Une maquette de « carte de guidage » est spécifiquement conçue et installée sur une boucle d'essais utilisant l'adaptation d'indice de réfraction pour réaliser des mesures de vélocimétrie laser en milieu transparent. Les mesures 3D3C se concentrent autour d'un crayon central à l'aval d'une carte de guidage et reposent sur la technique de défocalisation développée lors de la thèse de R.Baudoin. Cette technique utilise notamment un dispositif optique breveté permettant de façonner l'image apparente des particules pour limiter le taux de superposition tout en garantissant un bon rapport signal/bruit. Après une calibration in-situ non intrusive, les trois composantes de la vitesse sont obtenues sur volume de 50x30x20 mm³ avec une seule caméra et une incertitude de l'ordre de 0,1 px dans les trois directions. Pour vérifier la validité des résultats 3D3C, une comparaison avec des mesures LDV est entreprise. La distribution spatiale des vitesses axiales le long d'un profil traversant l'axe du crayon et la dynamique de l'écoulement via la fréquence de coupure de la DSP de vitesse sont correctement captées. Malgré une densité limitée de vecteurs (environ 0,001 ppp), l'accélération Lagrangienne, déduite de la trajectoire des particules, devrait permettre de reconstruire des champs de pression instantanée autour d'obstacles en vue d'accéder aux efforts hydrauliques qui leurs sont appliqués. L'objectif industriel reste en effet de caractériser ces efforts en vue de réduire l'excitation des crayons et donc l'usure des structures. La technique 3D3C, notamment la précision en profondeur, continue d'être affinée en partenariat avec le laboratoire EM2C- CNRS de CentraleSupélec.

1 Contexte industriel

L'interaction « fluide-structure » est une problématique majeure dans le domaine nucléaire, notamment la vibration sous écoulement des structures immergées que sont les crayons de grappes de contrôle contenant des absorbants neutroniques. En raison de leur fort élancement (environ 4 m de haut pour environ 10 mm de diamètre), ces crayons sont très flexibles, même fixés à une tête appelée « araignée » (voir Figure 1) à laquelle on impose les mouvements de montée ou descente pour modérer la réaction nucléaire. Les grappes de contrôle sont donc guidées lors de ces mouvements. En partie haute, le guidage est discontinu et constitué de cartes de guidage régulièrement espacées en hauteur. En partie basse, le guidage est continu et se présente comme un ensemble de fourreaux pour les crayons de la grappe (voir Figure 2). La vibration sous écoulement des crayons de grappe engendre une usure du

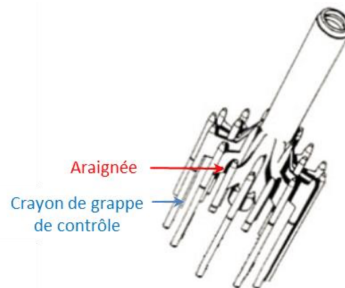


Figure 1: Araignée et crayons de grappe de contrôle.

guidage par chocs et frottements pouvant conduire à terme à son remplacement. L'écoulement autour d'une carte de guidage, source présumée pour l'excitation hydraulique des crayons de grappe, est donc étudié sur une maquette dédiée en milieu transparent. L'objectif est de localiser et quantifier ces efforts via la reconstruction du champ de pression autour des crayons à partir de mesures 3D3C de vitesse.

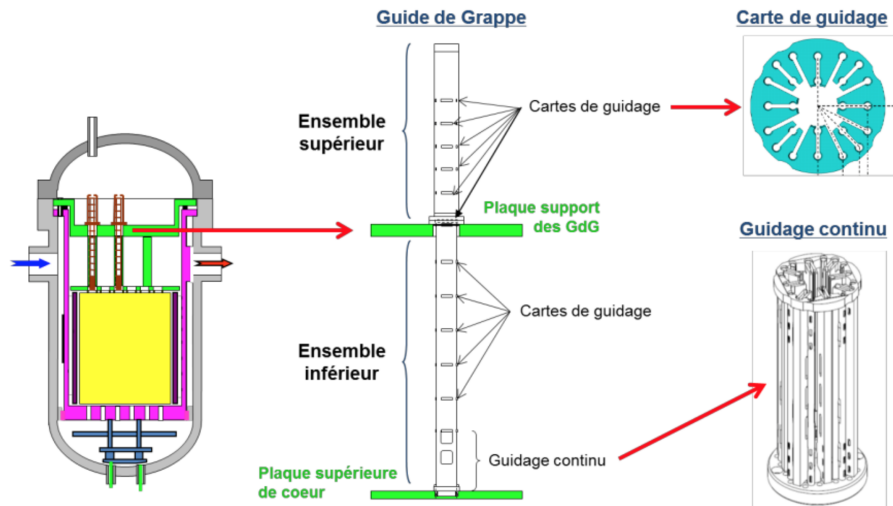


Figure 2: Position des grappes de contrôle dans le réacteur nucléaire (à gauche), détail du guide de grappe (au centre), guidage discontinu - carte de guidage - et continu (à droite).

2 Maquette d'essais

Une maquette transparente en Altuglas contenant 2 cartes de guidage traversées par 24 crayons est spécifiquement conçue pour faciliter la vélocimétrie laser via l'imposition de faces extérieures planes. Le maintien de la carte d'étude (centrale) étant assuré par des tiges filetées placées dans les coins pour ne pas trop restreindre le champ de vue, la forme des cartes de cette maquette d'essais est carrée et diffère donc légèrement de la forme réelle illustrée en Figure 2. Le motif étoilé du guidage réel est quant à lui respecté. La maquette est montée sur une boucle d'essais dédiée utilisant l'adaptation d'indice de réfraction avec un fluide d'essais s'approchant au mieux de l'indice de réfraction de l'Altuglas ($n \approx 1,49$). La maquette d'essais et la surface libre du liquide (localisée en dessous de la carte d'étude) utilisé pour l'adaptation d'indice sont illustrées en Figure 3. Un phénomène d'irisation peut être observé sur les obstacles solides selon l'angle de vue.

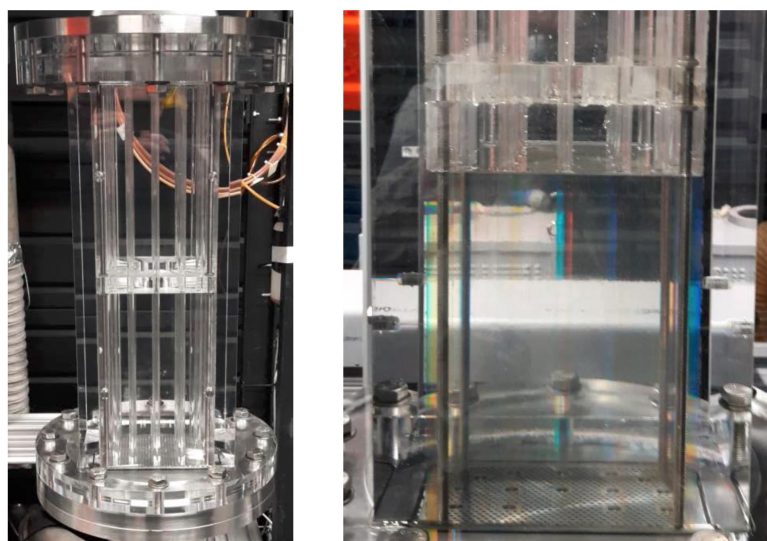


Figure 3: Maquette d'essais en Altuglas (à gauche) et milieu transparent par adaptation d'indice lors d'une immersion partielle de la maquette dans le fluide d'essais (à droite).

3 Technique de mesures 3D3C par défocalisation

Des mesures 3D3C de vitesse sont donc menées sur cette maquette en milieu transparent autour d'un seul crayon à l'aval de la carte d'étude. La technique de mesures 3D3C utilisée a été développée dans le cadre de la thèse de R. Baudoin en partenariat avec laboratoire EM2C-CNRS ([1]) de CentraleSupélec. Elle s'appuie sur le principe de défocalisation proposé à l'origine par Damaschke et al. en 2005 ([2]).

Le principe de la technique est que la taille d'une particule sur l'image défocalisée n'est fonction que des caractéristiques du montage optique (ouverture et focale) et de la distance en profondeur de la particule par rapport à l'objectif optique. Ce principe est illustré en Figure 4 pour 2 particules A et B situées à 2 profondeurs différentes mais à la même altitude par rapport à la ligne optique. La Figure 4

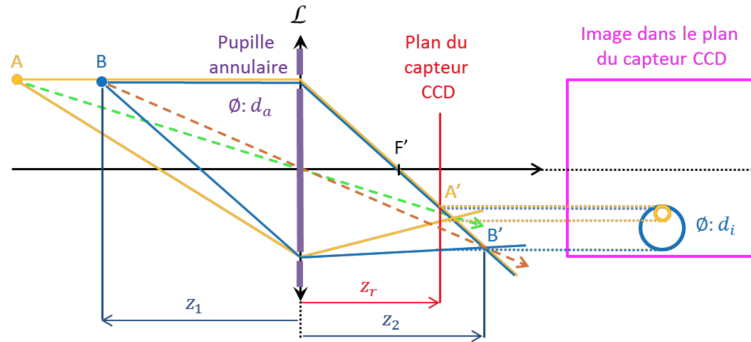


Figure 4: Accès à la position des particules en profondeur (vue de la caméra) par défocalisation avec pupille annulaire (brevet AREVA-CNRS en référence [4]).

montre, en plaçant le plan du capteur CCD avant les plans de mise aux points des particules A et B, que l'image des particules sur le capteur possède un diamètre lié à sa position en profondeur. Si l'image défocalisée d'une particule (source considérée ponctuelle) à travers un objectif classique est un disque plein, la Figure 4 met en exergue l'utilisation du dispositif de compression optique agissant comme une pupille annulaire et faisant l'objet d'un brevet conjoint AREVA – CNRS ([4]). Ce dispositif simple permet d'engendrer un cercle (et non un disque) sur l'image défocalisée conservant ainsi l'information de profondeur (i.e. le diamètre apparent de la particule) tout en augmentant à la fois la précision de localisation de la particule et le taux de superposition admissible. D'un point de vue théorique, sous l'hypothèse des lentilles minces, la relation suivante s'applique :

$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Les grandeurs f , z_1 , z_2 désignent alors respectivement la distance focale image de l'objectif, la distance du point source (particule ponctuelle) au « plan » de l'objectif et la distance de ce plan à l'image géométrique. Sur la Figure 4, z_r est la distance de ce même plan au capteur CCD et d_a le diamètre de la pupille annulaire d'un objectif supposé circulaire. Par homothétie de triangles et après manipulation des relations obtenues, l'équation proposée par Damaschke et al. en 2005 ([2]) apparaît :

$$d_i = d_a \left| 1 - z_r \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_1} \right) \right| \quad (2)$$

Elle souligne la dépendance du diamètre « apparent » de la particule sur l'image défocalisée en fonction des paramètres optiques (diamètre d_a de l'objectif bridé par la pupille, focale f) et de la distance de l'objet au plan de l'objectif z_1 . Les objectifs réels n'étant pas des lentilles minces, une calibration in-situ est nécessaire pour définir la loi reliant la taille apparente d_i à la position en profondeur z_1 de la particule. Ainsi, la position en profondeur d'une particule via son « diamètre apparent » est accessible en plus des 2 autres composantes de position dans le plan de l'image. Une localisation en 3D de la particule est donc possible avec une seule caméra.

Les images sont acquises puis post-traitées numériquement en 2 étapes principales :

- La détection des particules et la détermination de leur position par corrélation croisée avec des motifs circulaires de différentes tailles appelés « canevas »
- Le suivi Lagrangien (PTV) des particules via l'algorithme prédicteur-correcteur de Keane et al (1999) ([5])

Suite à ces 2 étapes, les déplacements sur l'image (et donc les vitesses puisque la fréquence d'acquisition est connue) sont déterminés. Les trajectoires des particules peuvent être générées pour disposer de l'accélération Lagrangienne permettant de reconstruire a posteriori un champ de pression. Ces grandeurs (vitesses, accélération) connues aux positions des particules à un même instant (approche Eulérienne) peuvent être enfin interpolées sur une grille Cartésienne pour obtenir des champs et réaliser divers post-traitements (ex : décomposition par POD pour une analyse dynamique poussée).

En fin de thèse CIFRE, R.Baudoin réalise des mesures 3D3C dans un écoulement à l'aval d'une grille de mélange au sein d'une maquette d'assemblage combustible constituée de 5x5 crayons en Altuglas ([1]). Les images sont acquises avec un laser incident à 45° de 2 caméras placées à 90° l'une de l'autre pour tenter de compenser l'imprécision en profondeur par une identification croisée des particules sur les 2 caméras et ne conserver que les composantes dans le plan des images. Les images obtenues et le montage expérimental utilisé (issu de la référence [1]) sont illustrés en Figure 5.

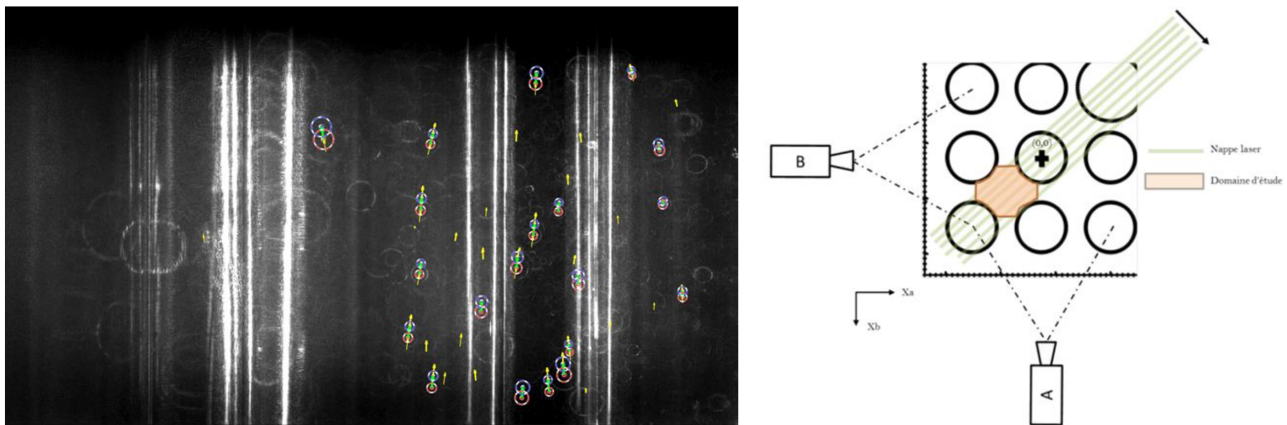


Figure 5: Image de fin de thèse de R.Baudoin (caméra A) et montage expérimental avec champ de vue dans la maquette d'assemblage combustible 5x5 (issu de la référence [1]).

Ces images, bruitées en raison de réflexions parasites sur les crayons, limitent les résultats à 80 particules détectées par image (instant) et seulement 7 particules suivies sur 3 instants consécutifs (voir référence [1]). A la suite de la thèse de R.Baudoin soutenue en 2015, des travaux d'industrialisation de la technique PTV 3D3C sont menés au centre technique de Framatome avec 3 objectifs principaux :

- Améliorer la qualité des images pour augmenter le signal / bruit des particules défocalisées
- Accroître la densité de particules détectées et suivies sur au moins 3 instants pour atteindre l'accélération
- Diminuer le temps d'exécution des post-traitements pour permettre une utilisation industrielle de la technique

4 Mesures 3D3C et moyens expérimentaux

En 2017, ces objectifs d'industrialisation sont atteints par :

- L'utilisation de particules fluorescentes permettant d'éliminer les réflexions parasites
- Le raffinement de la détection et du suivi des particules via l'implantation d'une version adaptée de l'algorithme « four-frames PTV » de Cierpka et al. (2013) ([6]) avec en plus une corrélation croisée de l'image de la particule entre instants successifs multipliant par 10 le temps d'exécution global.
- L'élimination des opérations redondantes, la revue de l'architecture des étapes de détection et de suivi des particules avec une transcription partielle des opérations les plus coûteuses en langage compilé (C++ via fonctions MEX) divisant par 5 le temps d'exécution global.

Après ces améliorations, des mesures 3D3C sont réalisées à 4 kHz autour d'un crayon central en aval de la carte d'étude. Le matériel utilisé pour ces mesures se compose d'un laser double cavité YLF Litron (jusqu'à 10 kHz), d'une caméra rapide Phantom V611 (cadencée jusqu'à 6 kHz en pleine résolution de

1280 x 800 pixels) et d'un objectif Nikon Nikkor AF-DC (Defocus Control) 105 mm ouvert à F/2.8 avec bague allonge et filtre en longueur d'onde à 570 nm. Le nombre de Reynolds, lié aux conditions de débit et à la viscosité du fluide transparent, est de 3.10^4 .

L'image obtenue et le champ de vue considéré (avec un laser arrivant de la droite) sont illustrés en Figure 6.

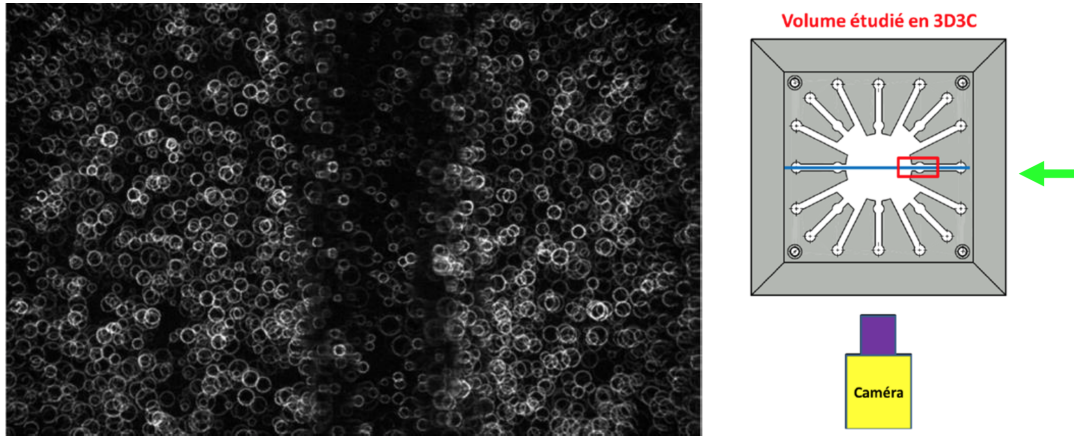


Figure 6: Image acquise en 2017 autour d'un crayon central et montage expérimental avec champ de vue dans la maquette incluant 2 cartes de guidage.

Une calibration in-situ est réalisée pour obtenir la loi d'évolution du diamètre (taille) apparent en fonction de la position en profondeur de la particule. Pour le volume étudié de $50 \times 30 \times 20 \text{ mm}^3$ (Hauteur x Largeur x Profondeur), la calibration s'appuie sur l'acquisition d'une centaine d'images dans 10 plans successifs (ou plus) séparées de 2 mm en profondeur. La détection des particules sur 100 images par plan engendre assez d'échantillons (tailles des particules) pour disposer de statistiques satisfaisantes (moyenne et écart-type de taille apparente sur l'image). La loi d'évolution est généralement un polynôme d'ordre 3 mais peut être considérée en première approximation comme une fonction affine (voir Figure 7 avec les moyennes représentés par des points rouge et l'écart-type par les barres d'erreurs). A partir

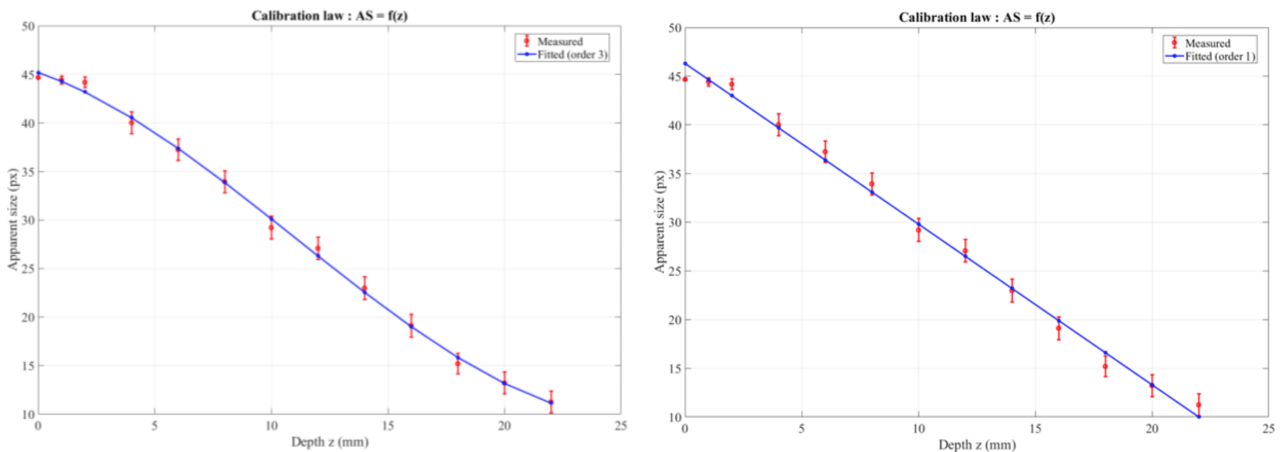


Figure 7: Lois de calibration « taille (diamètre) apparente = $f(\text{profondeur})$ » décrite par un polynôme d'ordre 3 (à gauche) ou d'ordre 1 (à droite).

de la loi de calibration en profondeur, la calibration dans le plan est déterminée à partir du diamètre du crayon et de la taille apparente moyenne des particules (le crayon étant au centre du volume de mesures en profondeur).

5 Résultats et discussions

Grâce aux images obtenues en Figure 6 et aux améliorations réalisées sur le post-traitement, 1000 particules sont suivies sur au moins 3 instants consécutifs pour une image de 1280×800 pixels soit

environ 0,001 ppp (particule par pixel).

Le temps de traitement de 20 000 images (soit 5 secondes d'acquisition à 4 kHz) est de 41 h (soit un peu moins de 2 jours) avec 27% du temps d'exécution utilisé pour la détection et 72% pour le suivi sur un simple PC de calcul. Les 1% restants englobent les post-traitements légers (ex : génération des trajectoires) hors interpolation sur un maillage Cartésien.

La distribution spatiale des particules suivies dans le volume de mesures est relativement homogène et fait apparaître naturellement la présence du crayon (voir Figure 8) en traçant les trajectoires des particules suivies sur 7 instants. Sur la vue du dessus en Figure 8, une ligne (en rouge) traversant diamétralement le crayon et un point (en bleu) localisent les vitesses 3D3C extraites sur 1 mm^3 pour comparaison et validation avec des mesures LDV de vitesses axiales. Les profils de vitesses axiales

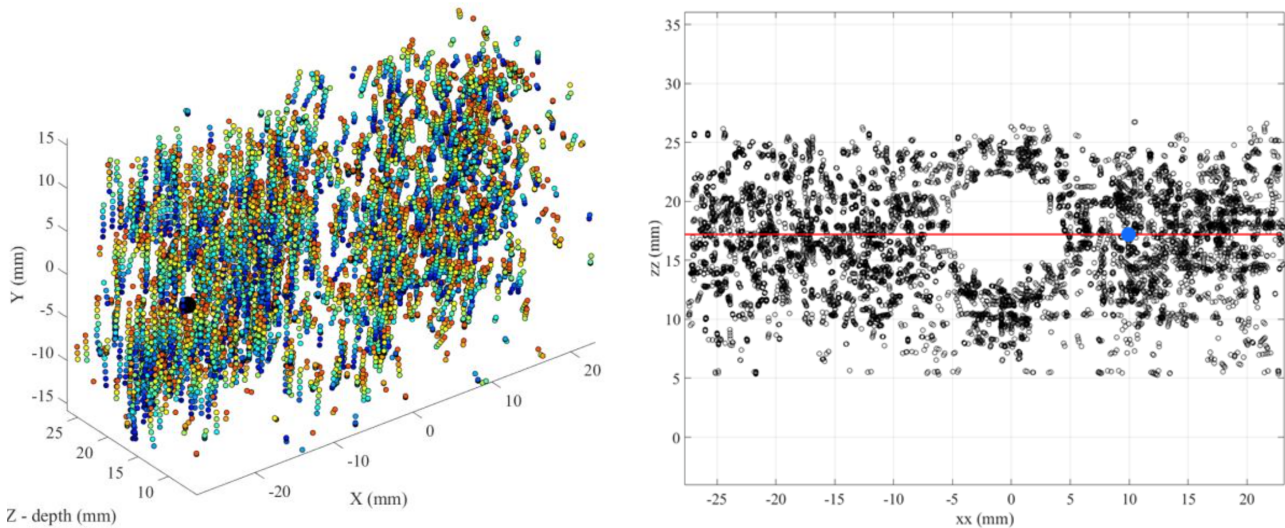


Figure 8: Trajectoires colorées par l'instant d'apparition des particules sur 7 instants (à gauche) et vue du dessus avec ligne et point d'extraction des vitesses (à droite).

(moyennes et écarts-types) 3D3C et LDV sont présentés en Figure 9. Les 2 courbes 3D3C mettent en évidence la présence d'un biais (courbe bleue) sur les valeurs moyennes 3D3C qui engendrent des résultats satisfaisants après correction (courbe jaune). Sur cette base réduite de résultats, on peut tout de même considérer que la distribution spatiale de l'écoulement moyen est correctement représentée par les mesures 3D3C. On note aussi que les vitesses axiales 3D3C sont relativement bruitées et ne donnent

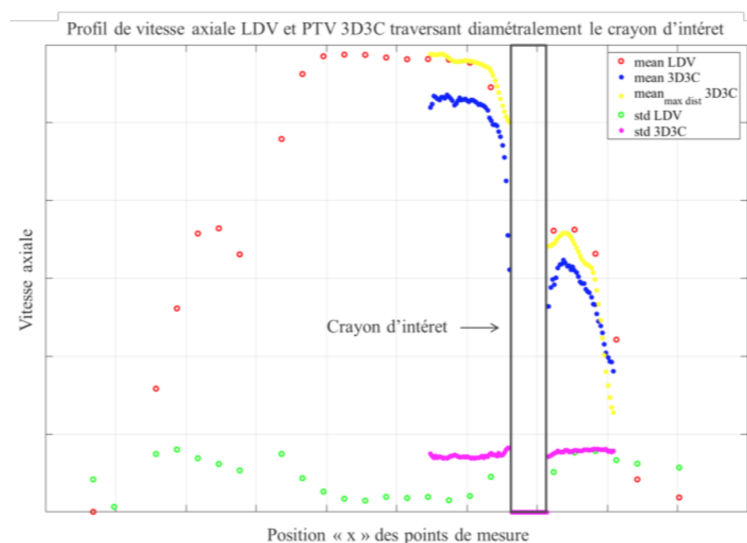


Figure 9: Profils de vitesse axiale LDV et 3D3C (sans et avec correction du biais sur les moyennes).

pas accès aux faibles niveaux de fluctuations (i.e. écarts-types $< 0,35 \text{ m/s}$). Des post-traitements plus poussés (ex : lissage des trajectoires par polynômes) permettraient très probablement de réduire ce bruit

et de détecter des niveaux de fluctuations moindres. Dans la zone où le niveau de fluctuations (écart-type) est cohérent avec les mesures LDV (i.e. à droite du crayon), une validation dans le domaine spectral est menée par la comparaison des distributions spectrales de puissance (DSP) de vitesse axiale au point d'extraction (bleu) illustré en Figure 8. Cette comparaison est également réalisée avec des mesures PIV déjà disponibles et post-traitées à la fois par corrélation croisée standard et par flot optique grâce aux algorithmes mis à disposition par le laboratoire partenaire EM2C – CNRS. La Figure 10 montre que la dynamique de l'écoulement, via l'allure et la fréquence de coupure de la DSP, est correctement capturée par les mesures 3D3C au point d'intérêt. En résumé, les travaux d'industrialisation menés à la suite de

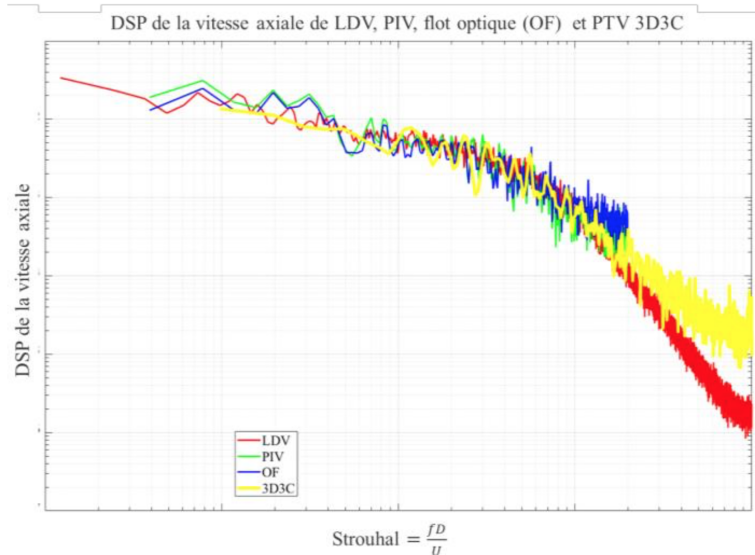


Figure 10: DSP de vitesse axiale LDV, PIV standard et flot optique (OF) et 3D3C.

la thèse de R.Baudoin permettent à cette technique de rivaliser avec la finesse de mesures LDV dans un volume 3D au sein d'une maquette industrielle avec une seule caméra. La calibration, par plans laser parallèles pour déterminer l'évolution de la taille apparente avec la position en profondeur, est aisée et non intrusive. Le temps de traitement de 20 000 images est industriellement admissible (2 jours) sur un simple PC de calcul. Même si certaines corrections et améliorations du post-traitement restent à réaliser, cette technique peut donc être déployée pour enrichir la compréhension d'écoulement 3D dans diverses applications industrielles.

6 Perspectives

En vue de finaliser la validation de la technique, il est prévu à court terme de confronter la vitesse 3D3C obtenue en profondeur à des mesures LDV transverses (hors du plan d'image de la caméra). Ceci permettra également de mieux quantifier l'incertitude sur la vitesse en profondeur, qui malgré une précision de l'ordre de 0,1 px, reste supérieure à celle des 2 autres composantes dans le plan. Des travaux continuent d'être menés pour affiner encore cette précision sur la vitesse en profondeur en partenariat avec le laboratoire EM2C-CNRS ([7]). La technique de défocalisation pour accéder à l'information de profondeur limite par essence la densité de particules admissibles sur l'image à environ 0,001 ppp comme présentée dans cette étude. Toutefois, sur la base des travaux conduits par Charonko et al. (2010) ([8]), même une densité réduite d'information (environ 20 points pour discrétiser la structure d'écoulement d'intérêt, ici l'écoulement autour du crayon) produit par reconstruction un champ de pression acceptable. Ceci permet donc d'envisager sérieusement la reconstruction de pression à partir des accélérations issues des trajectoires des particules suivies à l'image de celles présentées en Figure 8. Un algorithme de reconstruction, inspiré des travaux de T.Tronchin et al. (2015) ([9]) a été implanté et testé avec succès au centre technique dès 2015 à partir de champs de vitesses issus de calculs CFD. Cette méthode robuste nécessite toutefois l'interpolation des accélérations connues aux positions des particules sur un maillage Cartésien ce qui engendre des erreurs d'interpolations dont la propagation est peut être minimisée. D'autres approches Lagrangiennes plus performantes ont été développées depuis par de

nombreux chercheurs et sont notamment rassemblés dans l'article de synthèse de Van Gent et al. (2017) ([10]). Très prometteuses, elles permettraient de remonter aux efforts générés par l'écoulement sur les structures immergées, ce qui constitue un des objectifs majeurs de la PTV 3D3C développée au centre technique de Framatome.

References

- [1] R. Baudoin, Développement d'une technique de vélocimétrie laser en trois dimensions par suivi de particules basée sur le principe de défocalisation et son application autour d'obstacles en aval d'une grille, PhD Thesis, Ecole Doctorale n°579 CentraleSupélec, 2015
- [2] N. Damaschke, H. Nobach, Th.I. Nonn, N. Semidetnov, C. Tropea, Multi-dimensional particle sizing techniques, *Experiments in Fluids* (2005), pages 336-350, volume 39
- [3] R. Baudoin, L. Zimmer, T. Muller, Development and application of a time resolved dual camera 3D PTV technique around obstacles using defocus concept downstream a spacer grid, 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2014
- [4] R. Baudoin, L. Zimmer, Procédé et système optique de détection de particules dans un écoulement, Brevet 13-61580 (2014)
- [5] R. D. Keane, R. J. Adrian, Y. Zhang, Super-resolution particle imaging velocimetry, *Measurement Science and Technology* (1999), pages 75 – 768, volume 6
- [6] C. Cierpka, B. Lütke, C. J. Kähler, Higher order 4-frame Particle Tracking Velocimetry, *Experiments in Fluids*, (2013), pages 1-12, volume 54
- [7] R. Baudoin, V. Fichet, T. Muller, L. Zimmer, Three dimensional Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV) based on defocused images and optical flow approach, in preparation for *Measurement Science and Technology* (2019)
- [8] J. J. Charonko, C. V. King, B. L. Smith, P. P. Vlachos, Assessment of pressure field calculations from particle image velocimetry measurements, *Measurement Science and Technology* (2010) 105401 (15pp), volume 21
- [9] T. Tronchin, L. David, A. Farcy, Loads and pressure evaluation of the flow around a flapping wing from instantaneous 3D velocity measurements, *Experiments in Fluids* (2015), pages 7 -12, volume 56
- [10] P. L. van Gent, D. Michaelis, B. W. van Oudheusden, P. -é. Weiss, R. de Kat, A. Laskari, Y. J. Jeon, L. David, D. Schanz, F. Huhn, S. Gesemann, M. Novara, C. McPhaden, N. J. Neeteson, D. E. Rival, J. F. G. Schneiders, F. F. J. Schrijer, Comparative assessment of pressure field reconstructions from particle image velocimetry measurements and Lagrangian particle tracking, *Experiments in Fluids* (2017), pages 33 - 56, volume 58