



DEVELOPPEMENT D'UNE TECHNIQUE DE PTV 3D RAPIDE BASEE SUR LE PRINCIPE DE DEFOCALISATION ET SON APPLICATION AUTOUR D'OBSTACLES EN AVAL D'UNE GRILLE DE MELANGE

Raphael Baudoin^{1,2}, Laurent Zimmer^{2,3}, Thierry Muller¹

(1): Areva NP – Centre Technique

30 Boulevard de l'Industrie Espace Magenta BP 181 71205 Le Creusot CEDEX France

2: CNRS, UPR 288, Laboratoire d'Energétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C),
Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France

3: Ecole Centrale Paris, Grande Voie des Vignes, 92290 Châtenay-Malabry, France

*Correspondant: raphael.baudoin@ecp.fr

Résumé : Une technique de mesure de vitesse 3D par suivi de particules basée sur le principe de défocalisation est développée. Les limitations dues aux phénomènes de chevauchement particules sont dépassées en rajoutant un disque opaque entre l'objectif de la caméra et le capteur et la densité maximale de particules détectables s'en voit augmentée. De plus une deuxième caméra est utilisée pour obtenir les mêmes niveaux de précision pour les déplacements dans toutes les directions. Les algorithmes de détection et de validation sont présentés et une application du système est transposée dans le cadre d'un écoulement turbulent autour d'obstacles transparents en aval d'une grille de mélange. Des mesures préliminaires 2D sont réalisées afin de mieux quantifier les niveaux de vitesses et fournissent une base de données référence qui permettra de valider les mesures 3D. Des techniques de post traitements permettant d'extraire des informations sur la dynamique de l'écoulement sont appliquées sur les mesures 2D rapides et mettent en évidence des structures de type vortex à des fréquences validées par des mesures LDV. Finalement des premières mesures PTV 3D sont mise en œuvre avec une caméra et permettent de reconstituer des trajectoires sur une centaine d'instant.

1 Introduction

Dans le cadre du design des assemblages combustibles, un critère important pour les grilles de maintien de combustibles est la performance de celles-ci dans cas du flux critique de chaleur. En effet la valeur du flux de chaleur en cas de départ d'ébullition nucléée dépend de nombreux paramètres dont font parties les vitesses transversales générées par la grille. Dans l'optique de classer les grilles par rapport au phénomène du flux critique, des simulations numériques ont été largement utilisées pour prédire les niveaux de vitesses transverses ainsi que le niveau de turbulence en aval de la grille (Ikeda et al., 2006) (Bakosi et al., 2013). Cependant, les codes CFD doivent être validés avec des mesures expérimentales conduisant ainsi à une meilleure compréhension des structures mis en jeu dans le processus de mélange. Or la caractéristique de ce type d'écoulement repose sur son caractère tridimensionnel entre les faisceaux de crayons où l'accès optique est limité. Pourtant des mesures ponctuelles de type LDV et 2D par technique d'imagerie de particules (PIV 2D) (Dominguez - Ontiveros et Hassan ,2009), ont déjà été appliquées dans un cadre monophasique pour récupérer les fluctuations de vitesse. Mais à l'heure actuelle, aucune mesure de vitesse 3D n'a été réalisée.

C'est pourquoi nous nous proposons de présenter dans cette étude l'application d'une technique de mesure 3D résolue en temps dans une boucle hydraulique transparent décrite par la suite.

La technique actuelle la plus courante pour la mesure de vitesses 3D est la PIV tomographique pour laquelle la vitesse locale est obtenue en reconstruisant des profils d'intensité d'une image 3D à partir d'au moins quatre caméras (Elsinga et al., 2006) (Scarano, 2013). Néanmoins l'un des principaux inconvénients de cette approche est la grande sensibilité à la variation de l'intensité et du bruit dans l'image, menant à la détection de particules fantômes et des vecteurs de vitesse erronés, et ce en particulier à proximité de la paroi où les particules focalisées sont difficilement détectables. Ainsi, en dépit de la transparence des barreaux, il est difficile de supprimer complètement toutes les sources de bruit dans l'image. Une autre approche consiste à utiliser une stratégie de suivi, dans lequel les particules individuelles sont d'abord détectées et ensuite suivies dans le temps – PTV 3D. Cet article présente donc les résultats obtenus dans une veine d'essais hydraulique en utilisant une approche de suivi à l'aide de deux caméras. Dans un premier temps, une nouvelle extension de la technique de défocalisation permettant de récupérer les positions des particules dans le temps est présentée et la méthodologie pour récupérer les déplacements individuels est décrite. Une application et une validation de la technique dans un jet laminaire sont présentées. Ensuite, la boucle hydraulique est introduite avec les premiers résultats issus de mesures LDV et PIV. Finalement, il s'agira de discuter des mesures 3D ainsi que des techniques de post traitement associées.

2 Description de la technique optique et de l'approche lagrangienne

Le concept de défocalisation repose sur la capacité à localiser une particule dans l'espace à partir de leur centre, et de leur taille apparente "di" sur l'image de sorte que plus la particule est distante du plan focal de la caméra, plus celle-ci sera élevée (Damaschke et H. Nobach, (2002)). De plus comme décrit sur la figure 1, l'évolution du diamètre «di» est seulement fonction des paramètres que sont la focale, l'ouverture "da", ainsi que les distances séparant les lentilles, le capteur les particules. Une reconstruction tomographique est donc possible avec seule caméra. Cette première étape est réalisée avec une technique de reconnaissance de forme en utilisant la corrélation croisée entre des canevas artificiels ressemblant à des particules réelles et l'image (Takehara, 1999).

Détection de centre : Dans un premier temps, chaque image est corrélée à un ensemble de canevas artificiels de particules avec une gamme de diamètres allant de 10px à 70px. Chaque carte de corrélation est sauvegardée après un seuillage des cartes associées à une valeur minimum. Seuls les pics supérieurs à cette valeur sont conservés à position équivalente de pic, le pic de plus grande valeur correspondant à une taille de canevas fournira la taille. Une interpolation gaussienne dans chaque direction fournit une précision sous-pixel du centre de la particule.

Détection de la taille: Une étude locale est effectuée. En effet on isole l'image d'une particule détectée en se servant de l'information de taille « Ti » fourni par l'étape précédente et 3 corrélations croisées sont réalisées avec des canevas de tailles [Ti-1; Ti; Ti +1]. Les valeurs des trois pics sont récupérées et un interpolation gaussienne 1D est également effectuée pour récupérer l'information de taille avec une précision inférieure au pixel.

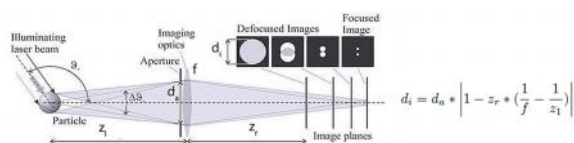


Figure 1 Schéma du principe de défocalisation - (Damaschke and H.Nobach, 2002)

Validation d'une particule : Pour chaque particule détectée, un rapport signal sur bruit (SNR) est déterminé et correspond au ratio du premier pic avec le second. Une valeur maximale de ce pic assure la qualité de corrélation entre l'image locale de la particule avec un motif artificiel. Finalement une hauteur minimale du pic de corrélation et du SNR minimum est nécessaire pour valider l'existence d'une particule. Cette approche de détection conduit à une précision 2D de 0.1px 2D et de 0.5px pour la détection de la taille apparente. Par conséquent si l'on cherche à conserver la même précision dans les 3

directions, deux caméras disposées à 90° sont nécessaires. Le manque de précision dans la profondeur d'une caméra étant compensé par la précision 2D de la seconde. Le deuxième avantage à avoir au moins deux caméras est de confronter plusieurs ensembles de détection et de ne conserver que les particules détectées par les deux caméras. Toutefois, un processus d'étalonnage rigoureux est nécessaire afin de relier l'emplacement des particules et la taille apparente sur chaque image de la caméra. Un tel étalonnage est développé ci-après et appliqué à la configuration finale.

3 Particules défocalisées avec l'ajout de l'espace annulaire

La technique de l'espace annulaire est une variation directe de la technique introduite par Lin et al. (2008). Celle-ci décrit l'insertion d'un masque annulaire en amont de la lentille de la caméra qui aboutit à la disparition du signal de particules à l'intérieur de l'anneau lumineux. La conséquence majeure de cette approche est l'augmentation de la densité de particules visibles et la diminution de la principale source de bruit à cause des particules se chevauchant sur les images.

Dans notre configuration, une ouverture annulaire est introduite entre l'objectif de la caméra et le capteur et permet de réduire la distorsion optique aux bords de l'image. Pour comparer l'évolution entre l'approche de défocalisation classique et celle avec l'espace annulaire, une configuration de référence a été réalisée avec un jet laminaire vertical sur lequel deux caméras sont montées face à face. Chacune d'elle illustre une configuration optique et sont synchronisées avec laser PIV Dantec. Et, puisque l'objectif est de comparer les deux approches, les deux caméras sont configurées pour capturer l'écoulement au même instant à résolution spatiale équivalente comme indiqué sur la figure 2. Les paramètres tels que la densité de particules ou encore la taille apparente des particules sont modifiés et les effets sur la qualité de la détection ou sur les profils de vitesse sont quantifiés.

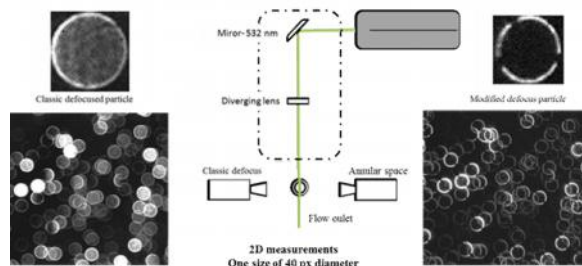


Figure 2 Schéma de principe du banc expérimental test-comparaison des 2 techniques avec acquisition synchronisée de l'écoulement.

Les principales conclusions de cette étude sont:

- Une augmentation de 30% de la capacité de détection.
- Une précision de détection accrue de 13% avec l'espace annulaire pour les particules de taille supérieure à 60 px.

Une fois les processus de détection et de validation terminés, l'association spatio-temporelle est obtenue en utilisant le procédé dit de "prédicteur-correcteur". Il utilise l'information de déplacement dans la région entourant le centre de particules pour améliorer la probabilité d'association. Ensuite, la vitesse locale $\mathbf{V}(\mathbf{X},t)$ est obtenue de l'association des positions successives de la particule dans le temps et dans l'espace de telle sorte que $\mathbf{V}(\mathbf{X},t)$ découle de l'équation 1 avec $\mathbf{X}(t)$ la position de la particule à un instant t

$$\mathbf{V}(\mathbf{X}, t) = \frac{\mathbf{X}(t + \Delta t) - \mathbf{X}(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (1)$$

Comme il a été précisé, le déplacement de la particule découle à une association de type « centre à centre » et donc l'erreur de détection impacte directement l'erreur de la vitesse. Pour diminuer cette erreur une corrélation locale de l'image d'une particule à deux instants successifs est disponible et fournit une précision sous-pixel plus fine. Cette approche utilise la corrélation croisée entre deux images de tailles égales au diamètre à l'instant considéré. Ensuite, de la même manière que pour une approche PIV, la position du pic de corrélation est interpolée et fournit le déplacement local de la particule.

A partir de ces associations les trajectoires des particules sont reconstruites. Il est donc possible d'isoler une trajectoire et d'étudier l'évolution de la vitesse et de l'accélération de particule également nommé accélération lagrangienne ou matérielle. Celle-ci est calculée à partir d'un schéma aux différences finies explicité dans l'équation 2.

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt}(\mathbf{X}, t) = \frac{\mathbf{V}(\mathbf{X}_{t,\Delta t}, t + \Delta t) - \mathbf{V}(\mathbf{X}_{t,\Delta t}, t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (2)$$

Cette quantité est d'un grand intérêt puisqu'elle permet de reconstruire le champ de pression soit en essayant d'intégrer le gradient de pression (3) (Liu et Katz (2006), Baur et Kongeter (1999)) ou résolvant l'équation (4) Poisson, (Gurka et al. (1999)).

$$\nabla p = -\rho \left(\frac{D\mathbf{V}}{Dt} + \mathbf{v}\nabla^2\mathbf{V} \right) \quad (3)$$

$$\nabla^2 p = -\rho \nabla \cdot \left(\frac{D\mathbf{V}}{Dt} + \mathbf{v}\nabla^2\mathbf{V} \right) \quad (4)$$

Cependant l'évaluation du terme d'accélération souffre des erreurs de troncature introduites à la fois lors de la reconstruction de la trajectoire et par l'approximation des dérivées par les méthodes de

différences finies. Cela est d'autant plus vrai dans notre cas où la précision de l'évaluation de la vitesse dans la profondeur est 10 fois plus faible que dans les autres directions. C'est pourquoi une interpolation polynomiale de chacune des composantes des trajectoires de plus de 10 instants est réalisée comme suggéré par Willneff, (2002). L'intérêt est de réduire les erreurs aléatoires qui peuvent découler de l'erreur de localisation. Seules les positions de particules successives sont en effet interpolées et permet de donner une solution analytique pour la vitesse et l'accélération en dérivant les polynômes à une ou deux reprises dans le temps. Enfin, après avoir isolé les trajectoires et conservé celles suffisamment longues pour s'assurer de l'existence de la particule (Elsinga et al. 2011, Novara et al. 2012), les données temporelles de vitesses sont déduites des trajectoires pour une utilisation future de post-traitements.

4 Description du montage

Les études expérimentales sont réalisées sur une boucle hydraulique en plexiglass (67,1 x 67,1x850 mm³) composé de 25 tubes de diamètre 9,5mm en plexiglass maintenus à l'intérieur par une grille à l'échelle 1. Afin de diminuer le nombre de changements successifs de milieu optique, l'indice de réfraction du fluide est modifié pour correspondre à celui du plexiglass, en résulte une augmentation de la masse volumique du liquide à 1840 kg/m³. La veine d'essais se compose de 24 crayons de combustible d'un diamètre de $D = 9,5$ mm et d'un tube central d'un diamètre de 12,5 mm, comme illustré sur la figure 3. L'ensemble est installé dans une veine en plexiglass à section carrée et le faisceau de crayons est maintenu à chaque extrémité par des grilles de maintien.

Ensuite la conception de l'ensemble permet d'effectuer des acquisitions 2D hautes cadences dans deux directions perpendiculaires grâce à deux caméras Phantom V611 d'une fréquence d'acquisition de 6242 images/seconde en pleine résolution de 1280 x 800 px. Ces caméras sont montées sur deux dispositifs de translations micrométriques commandés à distance pour un positionnement précis du plan focal et à une installation spécifique Thorlabs pour gérer la hauteur de sorte que les acquisitions peuvent être traitées le long de toute la hauteur de la boucle d'essai, de 10 à 40 diamètres hydrauliques «DH». Pour effectuer des mesures PIV rapides et PTV 3D rapides, le fluide estensemencé avec des particules de 10 microns et est éclairé par un laser YLF Litron à double cavité qui émet des impulsions d'une longueur d'onde de 527 nm avec une énergie de 8,5 mJ par impulsion à une fréquence de 4 kHz.

Un ensemble de lentilles cylindriques et sphériques sont utilisées pour générer la nappe laser et le faisceau afin d'illuminer une section de 50 x 50 mm².

Trois chemins optiques sont à distinguer pour le laser. Les deux premiers permettent un éclairage à 90° pour chacune des deux caméras, et la dernière configuration permet d'éclairer la veine avec un angle de 45 degrés par rapport à l'axe des caméras afin de bénéficier de l'intensité croissante en raison de la diffusion de Mie et surtout pour utiliser les deux caméras en même temps. Quel que soit la configuration, le jeu de lentilles est disposé sur un micro déplacement motorisé Zaber contrôlable à distance pour balayer la totalité du volume avec la nappe de laser avec une résolution $13 \mu\text{m}$. Enfin, le laser et la caméra sont synchronisés par un générateur de signaux EG de R&D Vision permettant de fonctionner soit dans un mode PIV à faible temps inter image Δt jusqu'à $3 \mu\text{s}$ soit dans un mode dit de suivi avec Δt constant égale à l'inverse de la fréquence d'acquisition.

5 Mesures 2D

La particularité de cette installation repose d'abord sur la capacité à effectuer des mesures 2D PIV résolues en temps au travers d'obstacles et ce, avec une très bonne résolution spatiale dans les deux sens. En outre, il est crucial de caractériser l'écoulement avec un ensemble de mesures planes 2D avant toute mesure 3D. Le volume étudié est composé d'un ensemble de trois par trois cylindres sur une hauteur de 20 mm . Le débit est fixé à 4 l/s de telle sorte que la vitesse verticale moyenne à l'intérieur de la section est de $1,5 \text{ m/s}$. Pour bénéficier d'une résolution spatiale plus fine lors des traitements PIV le système a été réglé avec un Δt inter image de $90 \mu\text{s}$ à une fréquence de 6 KHz . Par conséquent, le déplacement vertical moyen est centré autour de 8 px et le traitement PIV est achevé avec des fenêtres de 16 px pour un chevauchement de 50% . 14 plans différents sont acquis pour chaque caméra ce qui conduit à un espacement moyen de 2 mm dans le sens de la profondeur. L'écoulement moyen ainsi que les cartes des valeurs RMS sont reconstruites et fournissent une bonne estimation du comportement de l'écoulement. Par ailleurs ces acquisitions peuvent également fournir des informations fréquentielles et spatiales. A travers la création de sondes virtuelles des spectres de vitesses peuvent être comparés à de réelles mesures LDV 1D. Cette dernière technique a par ailleurs fourni des spectres dans ces mêmes zones de l'écoulement et un pic principal à 85 Hz apparaît clairement. Cette valeur est interprétée comme une fréquence de Strouhal liée à l'épaisseur de la grille de mélange. De la même manière, les mesures PIV révèlent le même contenu fréquentiel.

6 Techniques de post traitement

Une première étude de la vitesse en utilisant la LDV ou PIV 2D a révélé une fréquence principale qui peut être interprétée en tant que structure de vortex dû à

la grille-entretoise. Pour caractériser la dynamique d'écoulement et d'en extraire les structure cohérentes, la décomposition en mode dynamiques (DMD) et la décomposition en mode orthogonaux sont appliquées. La DMD, introduite par Schmid et al. (2009) comme un outil mathématique capable de fournir des informations dynamiques à partir de données numériques ou expérimentales. L'information extraite est désignée comme une généralisation de modes de stabilité globales qui peuvent être utilisés pour caractériser la dynamique d'un système. Il convient de préciser que l'algorithme DMD a besoin d'informations situées au même endroit pour chaque pas de temps. Par conséquent les vecteurs vitesses dispersés dans le temps et dans l'espace fournis par la technique ne peuvent être utilisés en tant que tel et nécessitent d'être interpolés vers un maillage fixe.

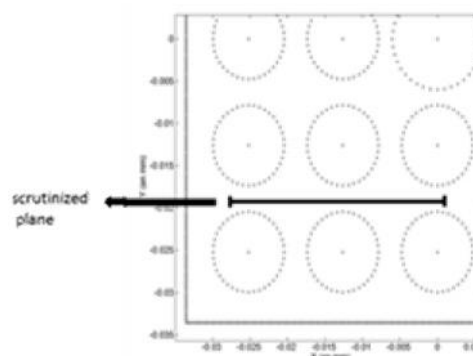


Figure 3 Visualisation du plan sélectionné

Dans un premier temps, la DMD est appliquée aux données de PIV 2D résolues en temps et un plan visible sur la figure 4 est choisi pour illustrer l'application. La figure 5 (a) montre le spectre obtenu par DMD pour un ensemble de 2800 champs de vitesses fournissant une résolution fréquentielle de $0,1 \text{ Hz}$ et présente un pic principal à $85,53 \text{ Hz}$. Le mode spatial reconstruit visible figure 6. Les fluctuations spatiales sont clairement situées sur la droite de la carte des vitesses, c'est-à-dire dans le centre de la section d'essai. Pour valider la fréquence détectée, une sonde virtuelle est placée dans ce domaine, comme suggéré sur la figure 5 (c), et récupère le signal de vitesse. Une analyse par densité spectrale de puissance de ces est traitée en utilisant la méthode de Welch et présente aussi un pic principal à 85 Hz pour les deux composantes de la vitesse. Cependant, DMD ne donne aucune information sur la valeur physique.

D'autre part la POD permet de décomposer l'écoulement en modes qui contribuent le plus à l'énergie globale de l'écoulement. Cette approche est de plus en mesure de fournir le niveau de chaque mode de vitesse. La méthode des « snapshots » développée par Sirovich (1987) est appliquée

seulement sur les champs de vitesses fluctuantes après sous traction du champ moyen.

Les dix premiers modes représentent 25% de l'énergie totale et les deux composantes du premier mode sont également représentées figure 7.

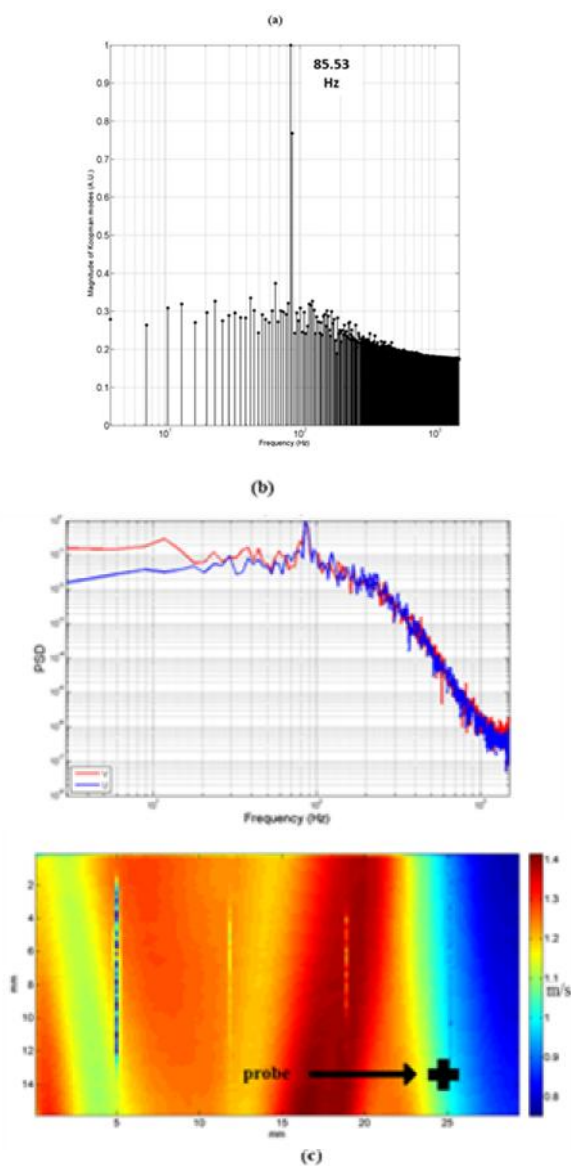


Figure 5 Etude fréquentielle: (a) Spectre DMD – (b) Densité spectrale de puissance pour les deux composantes de la vitesse d'une sonde dont la localisation est visible sur le champ moyen de vitesse verticale (c).

Une comparaison entre le premier mode POD et le mode DMD à 85 Hz permet de les associer. De plus, la représentation de l'écoulement sur la figure 8 montre nettement la structure de type vortex associée à ce mode. Pour confirmer cette association, une densité spectrale de puissance des coefficients du premier mode POD est calculée pour la vitesse débitante et transversale et sont tracées figure 9. Cette dernière présente également un pic principal à 85Hz.

7 Premières mesures 3D

Pour procéder à des mesures PTV 3D à l'intérieur du faisceau de crayons, l'étape de calibration est essentielle. Dans cette optique il est nécessaire de caractériser l'évolution de la taille apparente des particules avec la distance des plans focaux de chaque caméra.

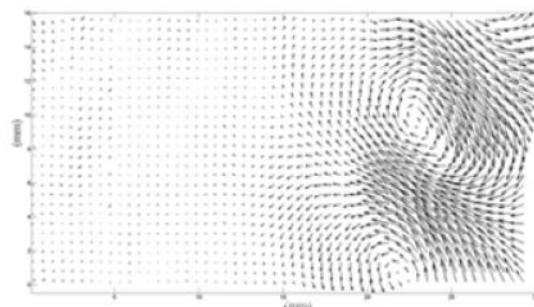


Figure 8 Visualisation du premier mode POD.

De même il est indispensable de créer des lois d'association spatiales entre elles. Ces deux étapes sont réalisées avec une densité d'ensemencement faible pour éviter les erreurs d'associations et un balayage par nappe laser pour chaque position (90°, 90°, 45°) tel que décrit dans la figure 3. Cette procédure d'étalonnage a été précédemment effectuée sur un jet laminaire vertical (Baudoin et Zimmer, (2013)). Le principe est le suivant, pour une taille "Ta" et une position (Xa, Ya) sur l'image de la caméra A, correspond une particule à une taille différente (Tb) et un emplacement (Xb,Yb) sur l'image caméra B. Dans un premier temps on cherche à créer les lois linéaires suivantes.

$$\begin{aligned} Y_a &= Y_b + b_3 \\ X_a &= a_2 * T_b + b_2 \\ T_a &= a_1 * X_b + b_1 \end{aligned} \quad (5)$$

L'utilisation de ces lois d'association permet par la suite d'automatiser l'association et de créer un ensemble de points dans le volume. Alors des lois d'association plus complexes sont créées en utilisant par exemple des techniques d'interpolation 3D cubique. Celles-ci sont finalement appliquées et permettent de tenir compte de phénomènes de distorsion optique.

Pour compléter l'étude finale, la PTV 3D est appliquée avec la technique de l'espace annulaire. Pour obtenir ces données, aucun obstacle n'est installé et une seule caméra est utilisée. Un volume de 33mm de largeur, 22mm de hauteur et d'une profondeur de 16 mm est étudié. L'évolution de la taille des particules est estimée à 1px pour 0,32 mm en débutant le volume par des particules de taille apparente de 12px. La résolution spatiale du plan image est de 1px pour 0.023mm. Pour éviter toute distorsion optique due à l'utilisation de la

défocalisation des objectifs spécifiques doivent être choisis comme les AF-CC 105 mm F / 2 Nikkor Nikon. Cette classe d'objectifs a l'avantage de posséder une bague « de contrôle de défocalisation » qui permet d'ajuster la netteté des zones hors mise au point et est parfaitement adapté pour l'acquisition de particules défocalisées. La figure 11 illustre cette explication en superposant 10 images consécutives.

À la suite de l'algorithme de détection décrit ci-dessus, les particules sont détectées pour chaque trame et sont associées à l'aide de technique de type « plus proche un voisin » ou encore de type « prédicteur-correcteur » puisque l'analyse locale PIV donnent d'excellents résultats de déplacement. L'approche du plus proche voisin est suffisante dans un premier temps car la faible densité des particules permet d'associer les particules sans trop d'ambiguïtés. Cependant, des particules fantômes peuvent être détectées avec une caméra. Par conséquent une limitation de 3 pixels est imposée pour l'association en taille car cela signifierait une vitesse transversale supérieure à 3m/s. De même le déplacement ne peut être que vertical. Au final, les champs de vitesse instantanés sont obtenus pour chaque pas de temps et sont définis comme la différence de positions successives des particules séparées par un intervalle de temps Δt . Ensuite, les trajectoires sont reconstruites et reportées sur la figure 12.

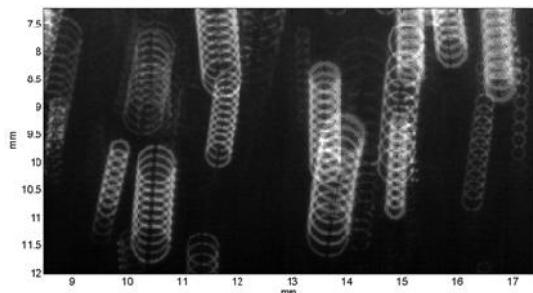


Figure 11 Acquisition volumique – Superposition de 10 images consécutives afin de visualiser les trajectoires des particules défocalisées

La caractéristique du suivi de particules par rapport à la PIV est de fournir des données dispersées dans le temps et dans l'espace. Or il a été montré précédemment que les techniques de post traitement ont besoin de données situées aux mêmes endroits quel que soit l'instant considéré. Nous avons donc besoin d'interpoler les variables PTV sur un maillage structuré cartésien en utilisant l'algorithme de Stuer et Blaser (2000) qui est basé sur une pondération gaussienne de la distance des vecteurs PTV par rapport aux points d'interpolation. Pour ce faire on définit un maillage structuré cartésien d'une finesse de 0,5 mm dans les directions de l'image et de 1mm dans la profondeur. La taille du maillage final étant

de 21x66x25 points. Sur chaque point du maillage, une interpolation locale sur un volume de 1x1x1 mm³ est définie afin de récupérer au moins 5 vecteurs à chaque instant. Cette étape permet de reconstruire la vitesse ou encore l'accélération lagrangienne sur une grille régulière requise pour les étapes de reconstruction de pression.

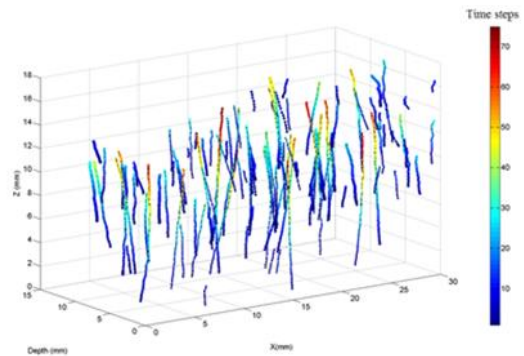


Figure 12 Reconstruction des trajectoires – 200 trajectoires tracées et coloriées en fonction de leur durée.

8 Conclusion

Basé sur le principe de défocalisation, l'information de la 3^{ème} dimension peut être récupérée grâce à la taille apparente des particules. Une technique de suivi tridimensionnel a été développée et améliorée par l'ajout d'un disque opaque entre l'objectif de la caméra et le capteur. Les modifications améliorent sensiblement la capacité de détection et de diminuent le bruit de l'image globale puisque moins de pixels sont illuminés. Elle permet également de déduire les déplacements 2D de manière plus précise grâce à une corrélation locale d'images successives des particules. Cependant, comme la précision liée à la détection de taille est plus faible que celle de détection du centre, une deuxième caméra est nécessaire pour obtenir la même précision des déplacements dans les trois directions. L'association des particules est réalisée avec des algorithmes classiques et efficaces dans le cas d'un écoulement faiblement ensemencé.

Finalement, l'ensemble de la technique est appliqué à un écoulement turbulent en aval d'une grille de mélange sur laquelle repose un faisceau d'obstacles. L'indice du liquide est ajusté pour correspondre à celui du plexiglass et permet de réaliser des mesures de vitesses non intrusives autour des crayons combustibles. Ensuite, afin de fournir une base de données des champs de vitesse références, une campagne de mesures 2D résolues en temps est réalisée dans les deux directions. Sur ces mesures 2D on a cherché à appliquer des techniques de post-traitement telles que la DMD ou la POD pour extraire des informations sur la dynamique de l'écoulement. L'étude révèle par exemple que le premier mode DMD à 85 Hz correspond au premier mode POD.

Cette fréquence étant physiquement obtenue par des mesures LDV dans les espaces inter-obstacles. Finalement des mesures 3D sont appliquées avec une caméra à l'aide de la méthode de l'espace annulaire nouvellement développée et fournissent des trajectoires de particules. De futures expériences avec 2 caméras doivent être réalisées pour quantifier l'erreur de déplacement par rapport à l'utilisation d'une seule caméra et les techniques POD et DMD seront appliquées sur les champs de vitesse 3D instantanées après interpolation sur une grille régulière. Une comparaison avec les résultats PIV 2D présentés sera nécessairement réalisée.

9 Remerciement

Ce travail a été réalisé en collaboration avec le laboratoire CNRS EM2C de l'Ecole Centrale de Paris et le Centre Technique d'Areva au Creusot.

10References

- [1] Bakosi, J., Christon M, Lowrie R, Pritchett-Sheats L, and Nourgaliev R (2013). Large-eddy simulations of turbulent flow for grid-to-rod fretting in nuclear reactors. *Nuclear Engineering and Design* 262, 544–561.
- [2] Baudoin, R. and L. Zimmer (2013). Calibration d'une technique de suivi de particules défocalisées en 3 dimensions pour écoulements diphasiques. cftl2012.coria.fr.
- [3] Baur T. and Königter J, (1999). PIV with high temporal resolution for the determination of local pressure reductions from coherent turbulence phenomena. , pp.1–6.
- [4] Caraghiaur, D, Anglart H, and Frid W, (2009). Experimental investigation of turbulent flow through spacer grids in fuel rod bundles. *Nuclear Engineering and Design* 239(10), 2013–2021.
- [5] Damaschke N. and Nobach H,(2002). Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics. *Experiments in fluids* 32, 143–152.
- [6] Dominguez-Ontiveros, E. E. and Y. a. Hassan (2009). Non-intrusive experimental investigation of flow behavior inside a 55 rod bundle with spacer grids using PIV and MIR. *Nuclear Engineering and Design* 239(5), 888–898.
- [7] Dominguez-Ontiveros, E. E., Y. a. Hassan, M. E. Conner, and Z. Karoutas (2012). Experimental benchmark data for PWR rod bundle with spacer-grids. *Nuclear Engineering and Design* 253, 396–405.
- [8] Elsinga, G., B. W. van Oudheusden, and F. Scarano (2006). Experimental assessment of tomographic-PIV accuracy. In *13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*.
- [9] Elsinga GE, Westerweel J, Scarano F, Novara M (2011) On the velocity of ghost particles and the bias error in Tomographic-PIV, *Exp. Fluids*, 50, 825-838
- [10] Gurka, R. et al., (1999). Computation of pressure distribution using PIV velocity data. *PIV Symposium*.
- [11] Ikeda K, Makino Y, and Hoshi M, (2006). Single-phase CFD applicability for estimating fluid hot-spot locations in a 55 fuel rod bundle. *Nuclear Engineering and Design* 236(11), 1149–1154.
- [12] Keane RD., Adrian R. J and Zhang Y, (1995). Super-resolution particle imaging velocimetry. *Measurement Science and Technology* 6(6), 754–768.
- [13] Lin D. et al., (2008). Three-dimensional particle imaging by defocusing method with an annular aperture. *Opt. Lett.*, 33(9), pp.905–907.
- [14] Liu X. and Katz J., (2004). Measurements of pressure distribution in a cavity flow by integrating the material acceleration. *ASME Heat Transfer/Fluids*, pp.1–11.
- [15] Novara M, Scarano F (2012) Performances of motion tracking enhanced Tomo-PIV on turbulent shear flows, *Exp. Fluids*, 52, 1027-1041
- [16] Scarano, F. (2013). Tomographic PIV: principles and practice. *Measurement Science and Technology* 24(1), 012001.
- [17] Schmid, P. J., L. Li-M, Juniper P, and Pust O, (2009). Applications of the dynamics mode decomposition. *Thero. Comput. Fluid Dyn*.
- [18] Sirovich L (1987) Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part I: coherent structures. *Q Appl Math* 45(3):561–571
- [19] Stuer, H. and S. Blaser (2000). Interpolation of Scattered 3D PTV Data to a Regular Grid. *Flow, Turbulence and Combustion* 64, 215–232.
- [20] Takehara K. and Etoh T, (1999). A study on particle identification in PTV particle mask correlation method. *Journal of Visualization* 1(3), 313–323.

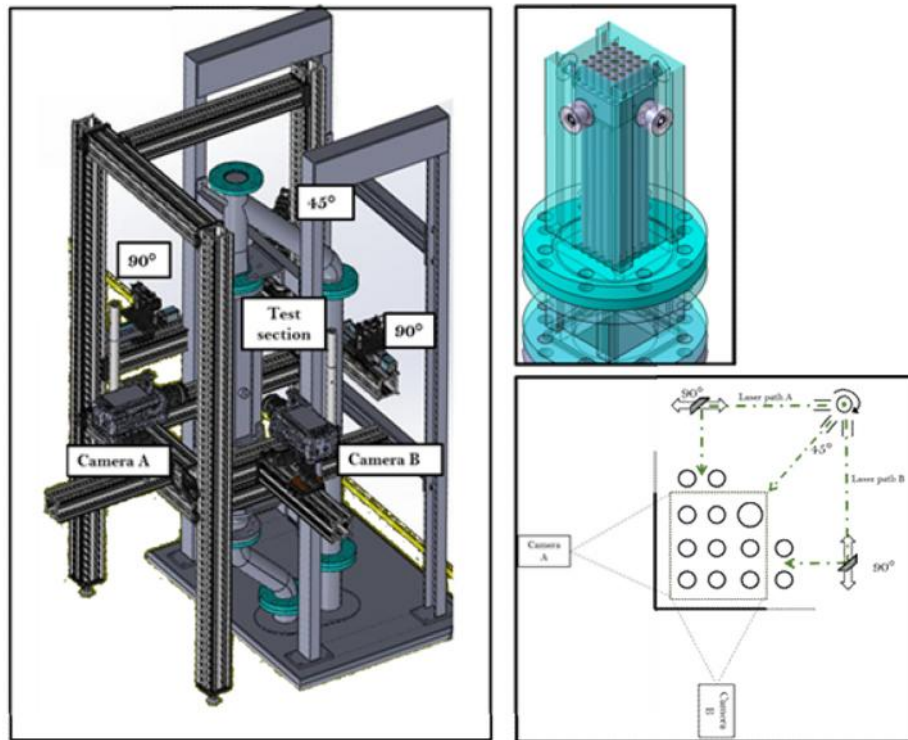


Figure 4 Visualisation du montage (a gauche) avec une vue rapprochée de la veine d'essai (en haut a droite) et un schéma des différents chemins optiques pour l'éclairage (en bas a droite).

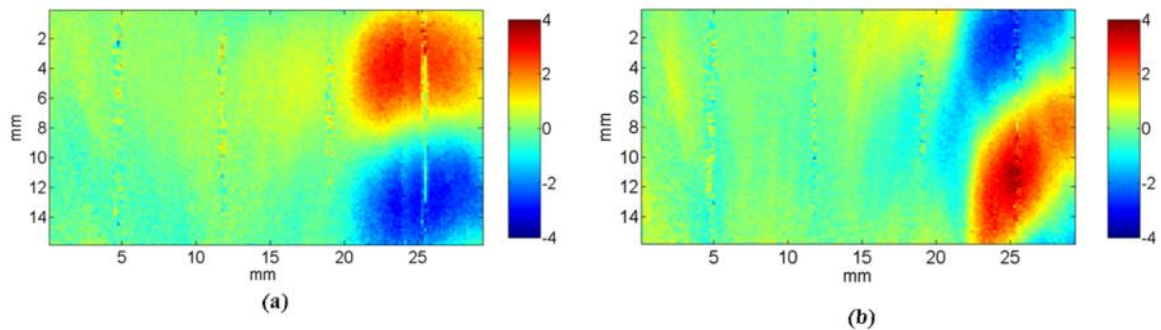


Figure 6 DMD mode 85Hz – composante transverse (a) – composante verticale (b)

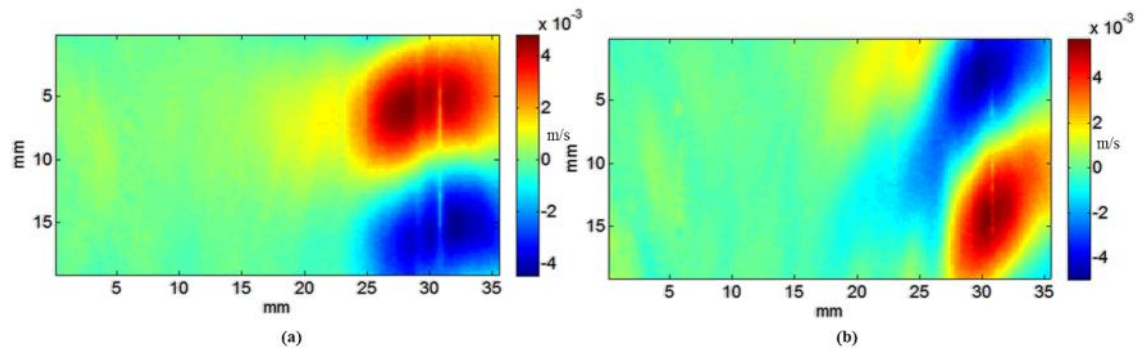


Figure 7 Premier mode POD – composante transverse (a) – composante verticale (b)