

Analyse par imagerie laser des interactions entre une turbulence diffuse et un nuage de particules

Laure Vignal^{****}, Véronique Roig^{*}, Livier Ben^{*} & Jacques Borée^{**}

^{*} Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Allée du Prof. C. Soula, 31400 Toulouse

^{**} Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, ENSMA, Poitiers

laure.vignal@hmg.inpg.fr

Résumé :

Cette étude expérimentale porte sur la caractérisation des interactions entre un nuage de particules solides et un écoulement de jet d'air confiné, présentant une région de dynamique proche d'une turbulence homogène isotrope. L'originalité de l'expérience consiste à mesurer simultanément les champs de vitesse des particules et du fluide afin d'analyser le couplage entre les deux phases. Ces résultats sont obtenus en couplant la technique de PIV 2D2C (2 dimensions 2 composantes) classique et une méthode de PTV développée afin de permettre une mesure de vitesse des particules pour des écoulements globalement dilués mais présentant des zones de fortes surconcentrations en particules. Une analyse de la position instantanée des particules a mis en évidence un régime de concentration préférentielle qui modifie fortement la turbulence du fluide. La mesure simultanée des deux champs de vitesse a permis aussi de définir les statistiques conditionnelles des vitesses du fluide près des particules.

Abstract :

This experimental study concerns the characterisation of the interactions between a dispersed phase consisting in solid particles and a turbulent air jet confined in a tube, presenting a region as similar as possible to homogeneous and isotropic turbulence. The originality of the experiment consists in simultaneous measurements of the velocity fields of the particles and of the fluid in order to analyse the coupling between the two phases. These results are obtained by coupling the traditional technique of PIV 2D2C (2 dimensions 2 components) and a method of PTV developed in order to allow a velocity measurement of the particles for globally dilute flows with zones of strong particles over-concentrations. An analysis of the instantaneous position of the particles demonstrates that preferential concentration of the particles exists and strongly modifies the turbulence of the fluid.

Mots-clés : concentration préférentielle ; écoulement diphasique ; mesures PIV/PTV simultanées

1 Introduction

Les écoulements diphasiques turbulents gaz-particules sont constitués de nuages d'inclusions en mouvement relatif dans un fluide porteur. Les interactions entre le nuage de fines particules et l'écoulement gazeux turbulent peuvent par exemple modifier la structure de la turbulence de l'écoulement porteur, la vitesse relative des particules, leur dispersion, ou donner lieu à de la « concentration préférentielle » (Squires et al. 1990). Dans ce travail, nous souhaitons étudier la dynamique d'un écoulement turbulent de jet confiné ensemencé en particules, qui présente dans une région particulière de l'écoulement d'intéressantes propriétés d'homogénéité et d'isotropie. Nous avons donc développé une méthode de diagnostic optique couplant des techniques de PIV (Particle Image Velocimetry) et de PTV (Particle Tracking Velocimetry) afin de mesurer simultanément les champs de vitesses de la phase continue et de la phase dispersée.

Dans ce document, nous présentons tout d'abord le dispositif expérimental, puis la spécificité des algorithmes PIV/PTV utilisés pour la mesure des champs de vitesses des deux phases. Dans le dernier paragraphe, nous reportons quelques résultats de cette étude sur l'écoulement diphasique gaz-particules concernant notamment la modification de la turbulence du fluide en présence de particules.

**** présente adresse : Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble

2 Dispositif expérimental

L'écoulement de référence retenu est celui d'une turbulence diffusives (proche de la turbulence homogène isotrope THI) dans un jet axisymétrique confiné. Le comportement de cet écoulement de jet de tube a été étudié en régime monophasique par Risso *et al.* (1997). L'intérêt de cet écoulement est de créer une zone où l'isotropie et l'homogénéité plane sont vérifiées autour de l'axe du tube et où l'écoulement moyen est négligeable devant les fluctuations de vitesses. Dans notre étude, nous avons ainsi analysé les interactions entre les particules et la turbulence dans cette région (Vignal 2006).

Dans notre dispositif expérimental (FIG. 1), l'air est amené à l'entrée d'un tube en verre de diamètre intérieur $D=98\text{mm}$ et de hauteur $H=850\text{mm}$. Il pénètre à la vitesse U_0 dans le tube par un injecteur circulaire de diamètre $d=10\text{mm}$ situé au centre de la section inférieure du tube. L'air ressort alors par une couronne annulaire (diamètre intérieur $D'=90\text{mm}$ et diamètre extérieur $D=98\text{mm}$) située à la périphérie de l'injecteur. Un système original d'ensemencement de particules solides est fixé sur le haut du tube et assure une fermeture hermétique. Ce système a été développé afin de maintenir une injection homogène et stationnaire des particules de verre (diamètre moyen $d_p=47\mu\text{m}$, densité $\rho_p=2460\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) par la section supérieure du tube. Le débit massique en particules est de 20mg/s .

Les paramètres expérimentaux adimensionnels qui caractérisent cet écoulement sont dans notre étude pour $U_0 \approx 58\text{m/s}$: le nombre de Reynolds $Re_{\text{initial}}=U_0 d/\nu_f \approx 38700$; le paramètre de confinement latéral $\alpha=d/D \approx 0.1$; le rapport des sections de passage de l'air $\beta=d^2/(D^2-D'^2) \approx 0.07$ et le paramètre de confinement longitudinal $\gamma=H/D \approx 8.7$. Ces nombres adimensionnels sont très semblables à ceux employés par Risso *et al.* (1997) dans leur étude pour le cas monophasique où une région de turbulence diffusives se développe au-delà de $z/D > 4.4$.

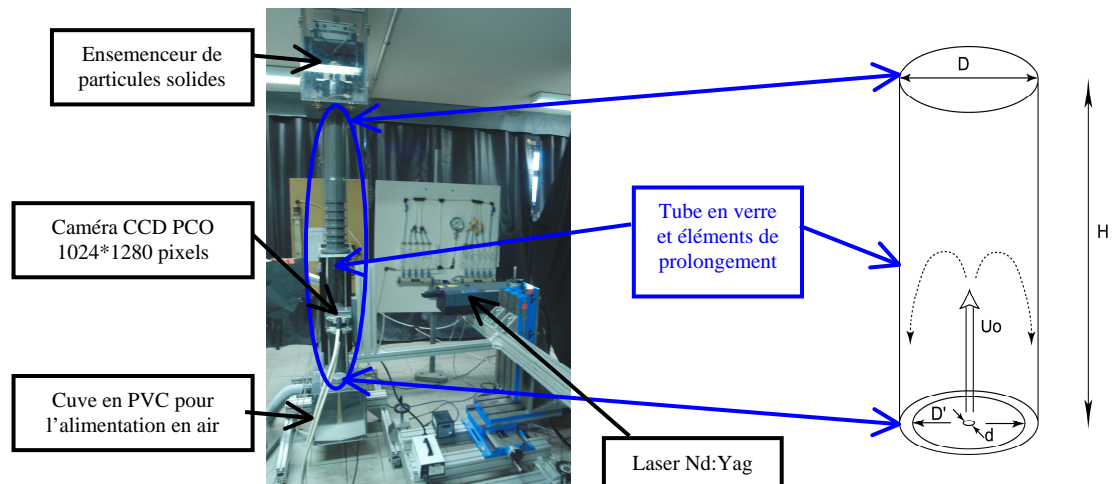


FIG. 1 – Dispositif expérimental

3 Mesures PIV/PTV dans l'écoulement turbulent diphasique

Pour les mesures de PIV/PTV, nous avons utilisé un laser YAG de $2 \times 30\text{mJ}$, une caméra numérique Sensicam CCD PCO (1280×1024 pixels). Les mesures ont été effectuées autour de l'axe du tube sur des champs de 5cm par 4cm , le fluide étantensemencé par des traceurs d'huile ($1-3\mu\text{m}$ de diamètre). Nous avons développé une méthode de mesures PIV/PTV 2D2C semblable à celle de Khalitov *et al.* (2002) afin de mesurer simultanément les champs de vitesse des deux phases. Les différentes étapes de l'algorithme de PIV/PTV sont présentées ci-dessous.

3.1 Séparation des particules et des traceurs sur les images de l'écoulement diphasique

Cette première étape consiste à séparer les particules et les traceurs sur l'image de l'écoulement diphasique par une technique de seuillage. On soustrait à l'image courante la moyenne locale de celle-ci. Cette moyenne est calculée sur des boîtes de 32 ou 64 pixels, afin de corriger les différences de niveaux présentes dans l'image. Ensuite, par un seuillage de l'image, nous détectons et enregistrons les pixels appartenant aux particules (FIG. 2). La dernière étape est l'assemblage des pixels contigus en objets. Pour chaque objet qui représente une particule, nous calculons les moments géométriques d'ordre 1 et 2 et nous cherchons le centre de masse. A partir de cette détection, nous pouvons obtenir des informations en terme de concentration de particules.

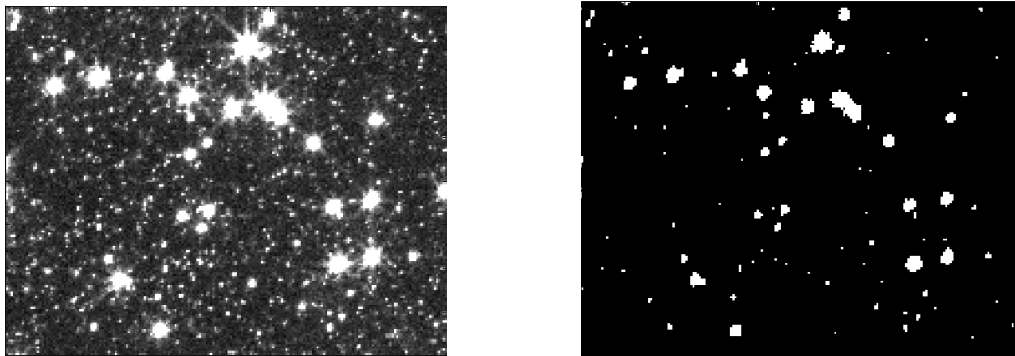


FIG. 2 Image diphasique avant (à gauche) et après (à droite) seuillage

3.2 Suppression des particules et algorithme de PIV pour la phase gazeuse

Cette étape consiste dans un premier temps à supprimer les particules de l'image diphasique afin de créer une image ne contenant que les traceurs du fluide. Il s'agit donc de remplacer toutes les particules détectées par un élément de substitution influençant le moins possible le futur calcul PIV. Les tests sur la PIV ont montré que l'élément le moins perturbant est un cercle dans lequel nous mettons un niveau de gris nul. Nous appellerons ces objets des « trous ». Comme la taille estimée de la particule est approximative, nous appliquons un « trou » légèrement supérieur au diamètre de la particule afin d'éviter les halos de particules.

Ensuite, nous avons utilisé, pour la mesure des vitesses du gaz, l'algorithme de PIV 2D2C développé par Maurel (2001). Il utilise une méthode multigrille itérative avec décalage et déformation des mailles de calcul. Nous avons choisi soigneusement les paramètres optimaux pour le calcul PIV (rapport entre la taille des mailles et le diamètre des traceurs, la concentration en traceurs, ...) afin d'obtenir des mesures robustes pour l'écoulement diphasique (Vignal *et al.* 2004-a, Vignal *et al.* 2004-b). De plus, un filtre médian est appliqué au champ final de vecteurs vitesses afin de détecter et d'éliminer les vecteurs vitesses erronés.

Une des grandeurs qui nous a particulièrement intéressé dans la suite de cette étude pour la compréhension des mécanismes physiques est la vitesse de glissement instantanée entre le fluide porteur et les particules. Ainsi, nous avons analysé la qualité des mesures de vitesse du gaz à proximité des particules. Pour cela, nous avons réalisé des tests avec des images de synthèse créées à partir d'images de traceurs disposées aléatoirement dans l'image et se déplaçant selon les vitesses du fluide issus de calculs DNS en écoulement diphasique (Fede *et al.* 2004). Sur ces images nous ajoutons des images de particules solides. Nous avons comparé la vitesse DNS à nos estimations de vitesse par PIV près des particules pour différentes densités de particules sur les images, et nous avons tracé l'erreur moyenne en fonction de la distance à la particule (FIG. 3). L'erreur est très importante à proximité des particules, mais elle diminue avec

l'augmentation de la distance à la particule. Elle est minimum et constante pour une distance plus grande que la maille de la première itération (32 pixels). Elle n'est pas égale à zéro parce que le calcul DNS correspond à un calcul avec des mailles de 8x8 pixels. L'application du filtre médian élimine une grande quantité de vecteurs faux, et diminue l'erreur particulièrement à proximité des particules. Cependant, l'erreur résiduelle est toujours trop importante et nous avons décidé d'éliminer les vecteurs situés dans un masque 32x32 pixels rectangulaire autour de n'importe quelle particule.

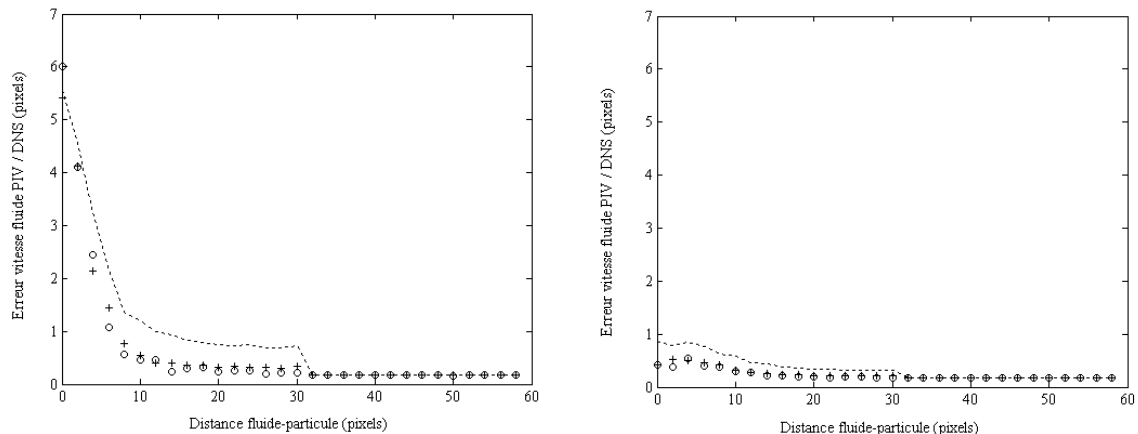


FIG. 3 Erreur sur le calcul PIV pour différentes densités de particules :
 --- 900; + 300 ; o 150 particules/image
 avant (gauche) et après (droite) application du filtre médian

3.3 Appariement et vitesses des particules avec l'algorithme de PTV

Nous avons développé un nouvel algorithme de PTV qui permet des mesures de vitesse de particules dans les groupes denses de particules basées sur les études de Keane *et al.* (1995) et Stellmacher *et al.* (2000).

Après avoir détecté les positions des particules, il faut appairer chacune d'entre elles avec son homologue sur l'image décalée en temps. Pour chaque particule nous définissons une boîte (64 ou 128 pixels) centrée sur la particule et nous calculons par intercorrélation le déplacement des objets contenus dans cette boîte. Ceci nous donne un déplacement approximatif de la particule (dx_1), et si plusieurs particules appartiennent à cette boîte, nous avons alors une estimation du déplacement corrélé des particules. A partir de ce déplacement (dx_1), nous définissons une boîte centrée sur la particule (20 pixels) et une boîte de même taille décalée de dx_1 sur la seconde image. Nous cherchons le nombre de particules dans chaque boîte et nous les apparions de façon systématique. L'appariement retenu est celui qui permet d'obtenir la variance minimale sur les déplacements trouvés. Afin de déterminer une valeur précise du déplacement (subpixel), et plutôt que de travailler avec le centre de masse, nous définissons une boîte de très faible extension autour de la particule dans chaque image puis nous calculons l'intercorrélation de ces 2 boîtes. Le pic d'intercorrélation est ensuite interpolé par 2 gaussiennes 1D afin d'obtenir la position du centre du pic et ainsi le déplacement subpixel de la particule. Ce calcul d'appariement est effectué de l'image 1 vers l'image 2 puis de l'image 2 vers l'image 1, si dans les 2 cas l'appariement est identique alors la mesure du déplacement est validée.

Les résultats obtenus pour la mesure de vitesses simultanées gaz-particules sont très encourageants car on peut remarquer (FIG. 4) une importante vitesse de glissement entre les deux phases, ce qui signifie que la mesure du champ fluide n'est pas altérée par les particules.

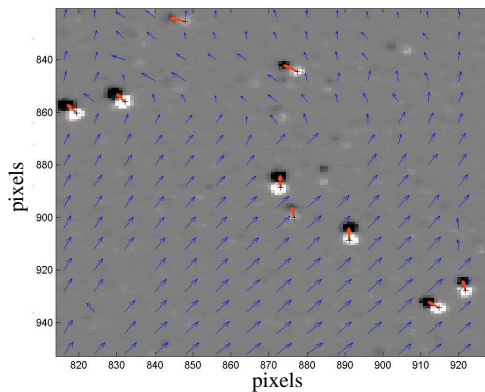


FIG. 4 Exemple de champs de vitesses calculés par l'algorithme de PIV/PTV à partir d'une image diphasique réelle

- vitesses du gaz
- vitesses des particules
- particules sur la 1^{ère} image
- particules sur la 2^{ème} image

4 Résultats

L'écoulement diphasique étudié dans notre configuration expérimentale se structure en trois zones principales : la région basse de jet confiné cisailé comparable au cas monophasique, la zone supérieure dominée par la présence des particules et la zone de raccordement entre ces 2 régions. Dans la région haute du tube, l'effet des particules se fait fortement sentir. Le fluide en écoulement diphasique a ainsi une composante de vitesse verticale négative renforcée. De plus, la présence des particules impose une augmentation notable de l'énergie cinétique fluctuante du fluide dans la zone haute (FIG. 5). Ce résultat est primordial, dans la mesure où il montre que le couplage inverse peut-être essentiel même dans des écoulements réputés très dilués, et où il montre également qu'il aboutit dans nos conditions particulières à une augmentation de l'énergie cinétique turbulente rarement observée dans la littérature (Yang *et al.* 2005). Une analyse de la position instantanée des particules a mis en évidence un régime de concentration préférentielle des particules qui est à l'origine de la forte modification de la turbulence du fluide. La mesure simultanée des deux champs de vitesse a permis aussi de définir les statistiques conditionnelles des vitesses du fluide au voisinage des particules essentielles à la compréhension des couplages entre la phase dispersée et le fluide. Nous avons ainsi estimé la vitesse du fluide aux points où se situent les particules (FIG. 6) à partir d'une interpolation spline cubique de la vitesse du fluide au voisinage des particules. L'analyse du mouvement relatif moyen entre les deux phases, en se basant sur ces statistiques conditionnelles, a permis de mettre en évidence l'écart entre la vitesse relative instantanée et l'écart des vitesses moyennes des particules et du fluide.

5 Conclusions

Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre de l'étude des écoulements diphasiques gaz/particules. L'objectif a été de développer un ensemble de programmes permettant des mesures de vitesses simultanées des deux phases. Le programme de PIV déjà existant a été validé pour un écoulement de type THI à partir d'images de synthèse puis d'images réelles propres à cette étude. Le programme de suivi de particules (PTV) a été entièrement développé pour cette étude. Cet algorithme de PTV propose une première étape de type PIV pour les particules, puis une seconde étape de suivi des trajectoires basée sur une minimisation d'une fonction d'appariement au sein des groupes de particules. Il a été validé sur des images de synthèse ainsi que sur des images modèles réelles même dans des endroits concentrés en particules. L'analyse des statistiques des champs de vitesse fluide diphasique dans la partie haute du tube met en évidence que la présence des particules provoque une augmentation de l'énergie cinétique turbulente par rapport à l'écoulement monophasique. Cette dynamique collective des particules, regroupées en amas, paraît une piste intéressante à explorer afin d'expliquer aussi la modification du mouvement relatif moyen des particules.

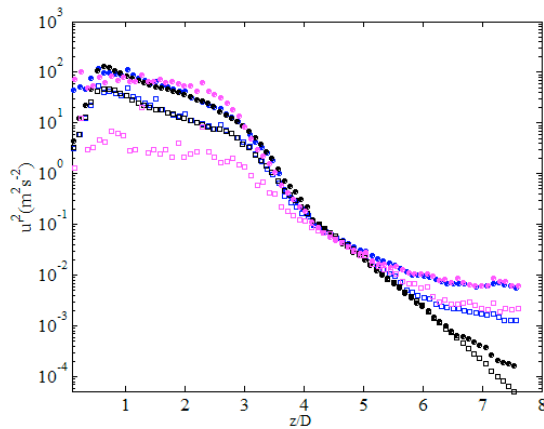


FIG. 5 Moments d'ordre 2 de la vitesse

○ : gaz en écoulement monphasique

● : gaz en écoulement diphasique et ● : particules

$$\overline{u_z^2} \text{ (o)}, \overline{u_r^2} \text{ (\square \text{ ou } +)}$$

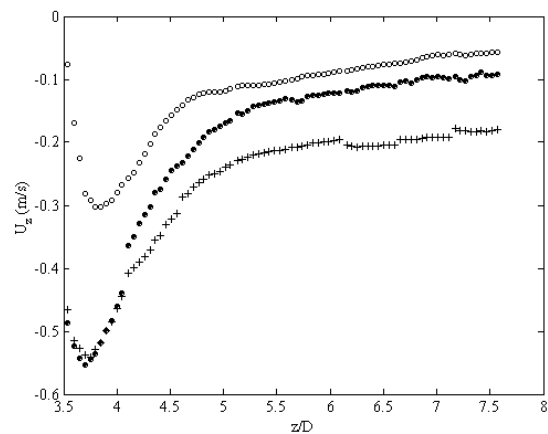


FIG. 6 Evolution axiale de vitesses moyennes en écoulement diphasique

$$\circ \overline{U_{zf}} + \overline{U_{zp}}$$

$$\bullet \langle U_{zf} \rangle_p$$

Références

- Fede P., Février P. and Simonin O. 2004 Numerical study of the effect of the fluid turbulence microscales on particle segregation and collision in gas-solid turbulent flows. 5th ICMF, Yokohama, Japan
- Keane R.D., Adrian R.J. and Zhang Y. 1995 Super-resolution particle imaging velocimetry. *Meas. Sci. Technol.* **6**, 754-768
- Khalitov D. A., Longmire E. K. 2002 Simultaneous two-phase PIV by two-parameter phase discrimination. *Experiments in Fluids* **32**, 252-268
- Maurel S. 2001 Etude par imagerie laser de la génération et de la rupture d'un écoulement tourbillonnaire compressé. Situation modèle pour la validation de simulations aux grandes échelles dans les moteurs. Thèse INPT, Toulouse, France
- Risso F. and Fabre J. 1997 Diffusive turbulence in a confined jet experiment. *J. Fluid Mech.* **337**, 233-261
- Squires K. and K. Eaton 1990 Preferential concentration of particles by turbulence. *Phys. Fluids* **A3**(5), 1169-1178
- Stellmacher M. and Obermayer K. 2000 A new tracking algorithm based on deterministic annealing and alternative distance measures. *Experiments in Fluids* **28**, 506-518
- Vignal L. 2006 Chute d'un nuage de particules dans une turbulence diffusive. Etude des couplages entre phases par diagnostics optiques. Thèse INPT, Toulouse, France
- Vignal L., Ben L., Roig V., Bazile R., Borée J. 2004-a Experimental study of a particulate turbulent confined jet by optical methods. 12th International Symposium on Applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal
- Vignal L., Ben L., Cazin S. 2004-b Validation de mesures couplées PIV-PTV en écoulement turbulent diphasique gaz-particules. 9^{ème} Congrès Francophone de Vélométrie Laser, Bruxelles, Belgique
- Yang T.S., Shy S.S. 2005 Two-way interaction between solid particles and homogeneous air turbulence : particle settling rate and turbulence modification measurements. *J. Fluid Mech.* **526**, 171-216