

Analyse de la structure de l'écoulement gaz-particules dans un lit fluidisé circulant par la PIV

A. ZAABOUT^{a,b*}, H. BOURNOT^b, C. SIERRA^b, B. KHARBOUCH^a, R. OCCELLI^b, A. DRAOUI^a

a. Laboratoire d'Energétique, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc

b. IUSTI - UMR 6595, Aix-Marseille Université, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille, France

Résumé :

Une étude expérimentale de l'écoulement gaz-particules dans une colonne à lit fluidisé circulant a été réalisée à l'aide de la technique de mesure PIV (Particle Imaging Velocimetry). Les vitesses axiales moyennes des particules et leurs écarts types ont été relevées sur trois hauteurs de la colonne de 0,5 m de diamètre D et de 5 m de hauteur H , et sont comparées aux résultats obtenus antérieurement à l'aide de la technique LDV (Laser Doppler Velocimetry) sur une colonne de même rapport d'aspect H/D . Ils sont en bon accord qualitatif. La technique de la PIV a mis en évidence l'existence de la structure cœur-anneau (flux de solide montant au centre et un autre descendant près de la paroi) caractérisant l'écoulement dans le lit fluidisé circulant, avec une diminution de l'épaisseur de la zone annulaire en fonction de la hauteur. Ensuite, les vitesses axiales et transversales moyennes des particules et leurs écarts types ont été relevés et analysés pour une hauteur relative $z/H = 0,35$ et ceci pour trois masses chargées en particules, respectivement de 10, 25 et 40 kg. Ces résultats ont montré l'existence d'une zone de transfert de matière entre le cœur et l'anneau, où son épaisseur croît avec la masse chargée. Une augmentation en valeur absolue de vitesses axiales moyennes des particules en fonction de la masse chargée est observée à la paroi.

Abstract:

An experimental study of gas-particle flow in a column of circulating fluidized bed was conducted using the measurement technique PIV (Particle Imaging Velocimetry). The column had 0,5 m in diameter D and 5 m in height H . The average axial velocities of particles and their standard deviations were found in three heights of the column, and are compared with results previously obtained using the LDV technique (Laser Doppler Velocimetry) on a column of the same aspect ratio H / D . They are in good qualitative agreement. The technique of PIV has revealed the existence of the core-annular structure (upward flow of solid in the center and another downward near the wall) characterizing the flow in the circulating fluidized bed, with a decrease of the thickness of the annular zone on the height. Then, the axial and transverse averages velocities of particles and their standard deviations were recorded and analyzed for the relative height $z / H = 0,35$ and this for three masses loaded of particles, respectively 10, 25 and 40 kg. These results showed the existence of a transfer zone of material between the core and the annular zone, where its thickness increases with the mass loaded. Increase in the negative sense of the average axial velocities of particles with the mass loaded is observed at the wall.

Mots clefs : hydrodynamique, lit fluidisé circulant, PIV, étude expérimentale.

1 Introduction

Les lits fluidisés circulant (LFC) sont largement utilisés dans plusieurs processus industriels, tels que la production de l'énergie, le craquage catalytique du pétrole (FCC), le séchage, l'enrobage des particules, etc. La compréhension de l'hydrodynamique des (LFC) est très importante pour la conception, le développement, et l'optimisation du fonctionnement de ces appareils. Or le comportement du mélange gaz-particules est très sensible aux paramètres opératoires, tels que la vitesse superficielle du gaz [1], le taux de solide en circulation [2], le diamètre de la colonne de fluidisation [3], la fonction de distribution en tailles des particules constituant la phase solide (PSD) [4], et la masse chargée en particules (m) ou la hauteur statique du lit (H_s). Plusieurs travaux ont mis le point sur l'influence de la masse chargée. Lewis et al. [5] rapportent que l'entraînement des solides est insensible à la hauteur de la zone dense. Matsen et al. [6] ont étudié

l'influence de la hauteur statique H_s sur un réacteur industriel à LFC (TSKTI Heat & Power Station) et ils ont conclu que la concentration en solide et le débit de solide entraîné croient avec H_s . De même Kehlenbeck et Yates [7] ont abouti à la même conclusion en étudiant l'influence de la masse chargée sur l'évolution du taux de vide et le débit de solide en circulation. Leur étude expérimentale a été effectuée sur une colonne à LFC de 5,5 cm de diamètre et en utilisant des particules de diamètre moyen compris entre, 170 et 800 μm , de densité comprise entre 1480 et 8900 kg/m^3 , et un chargement en masse allant de 1 à 15 kg. Les résultats trouvés montrent que la concentration du solide et le taux de solide en circulation G_s augmentent en fonction de la masse chargée. M'chergui et al [4], sur une colonne à LFC de 10 cm de diamètre et 1 m de hauteur, ont relevé les fluctuations de pression à une hauteur de 30 cm à partir de la grille de distribution pour différentes vitesses superficielles du gaz U_g et différentes hauteurs statiques du lit. Leurs résultats montrent que la fréquence majeure est d'autant moins importante que la hauteur du lit est plus élevée. Tsuji et al. [8] ont réalisé des mesures de vitesses des deux phases simultanées à l'aide de l'instrument Laser Doppler Anemometer dans les écoulements diphasiques dilués en conduite verticale de 3 cm de diamètre. Ils montrent que les augmentations du taux de chargement et de la taille des particules augmentent la turbulence. Moran & Glicksman [9] ont étudié l'écoulement du gaz, dans une colonne à lit fluidisé circulant, avec et sans particules, et ont montré que l'existence des particules solides de diamètre moyen de 164 μm avec une concentration moyenne sur la section de 0,98 %, peut augmenter la vitesse moyenne du gaz au double de la vitesse superficielle du gaz U_g , ainsi que son écart type. Zhang et Arastoopour [10], ont effectué des mesures des vitesses axiales de chaque classe de particules FCC de diamètre moyen de 70 μm à l'aide d'un anémomètre Laser Doppler, sur une colonne à LFC de 5 cm de diamètre et 2,74 m de hauteur. Pour trois masses chargées de 130 g, 650 g et 1300 g, ils concluent que les grands chargements en particules entraînent des vitesses de glissement inter-particulaires faibles, et des profils de vitesses plus lisses, ainsi qu'une augmentation des fluctuations des vitesses axiales des particules.

En conclusion, toutes les études précédentes montrent une influence certaine de la masse chargée en particules et/ou de la hauteur statique du lit H_s sur le comportement hydrodynamique du mélange, que ce soit sur le gaz [9] ou sur les particules [5, 7, 10], mais les résultats relevés restent très limités par le fait que les dimensions des colonnes à LFC utilisées sont très petites par rapport à celles des installations industrielles. Un autre point concerne les masses de particules mises en jeu qui restent très faibles, et les informations issues de ces conditions sont de portée limitée. De plus, l'information de l'influence de la masse chargée sur la structure moyenne du mouvement des particules est manquante. Dans le but se rapprocher de la taille des installations industrielles, le laboratoire IUSTI a mis en fonctionnement un pilote de lit fluidisé circulant de grande dimension (5 m de hauteur et 0,5 m de largeur). Une étude de l'influence de la masse chargée en particules sur la structure de l'écoulement a été réalisée sur cette installation. Une investigation par PIV (Particle Imaging Velocimetry) sur cette maquette nous a permis d'extraire les profils et les champs de vitesses instantanés, ainsi que les champs moyens de vitesse de la phase solide dans les plans médians de la colonne, et ceci pour trois masses chargées en particules, 10 kg, 25 kg et 40 kg. Nous avons concentré nos mesures sur la zone de désengagement et la zone diluée de la colonne.

2 Montage expérimental

Le dispositif expérimental (figure 1a) est constitué d'une colonne principale de fluidisation (1) à section carrée, d'un cyclone situé en haut de celle-ci pour la séparation du mélange gaz-solide (2), et d'une jambe de retour (3) qui joint ces deux éléments. La colonne de fluidisation et le cyclone sont transparents, afin de visualiser les structures de l'écoulement diphasique. Ce choix technologique permet également l'utilisation de techniques de mesures optiques non-intrusives, telles que la PIV (Particle Imaging Velocimetry), que nous avons utilisé dans cette étude, et la LDV (Laser Doppler Velocimetry). Les dimensions de la colonne ont été choisies de sorte à obtenir un même rapport d'aspect H/D correspondant à une installation industrielle typique ainsi qu'à deux autres maquettes de petites dimensions installées au laboratoire. Les particules solides utilisées pour nos manipulations sont des billes de verre de masse volumique $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$ et de diamètre moyen $d_p = 109 \mu\text{m}$. Le granulomètre Laser Malvern a été utilisé pour caractériser et déterminer la fonction de distribution en taille (FDT) par classes de diamètre et son diamètre moyen (figure 2). Les mesures de vitesse de notre étude ont été effectuées par technique PIV. Le système utilisé contient un Laser impulsif ND-YAG de 190mJ, une Camera CCD 4 MP, la synchronisation étant pilotée par un synchronisateur, et est paramétrée par le logiciel Insight (société TSI). Ce même logiciel est utilisé pour le post-traitement des images et la reconstruction des champs de vitesse.

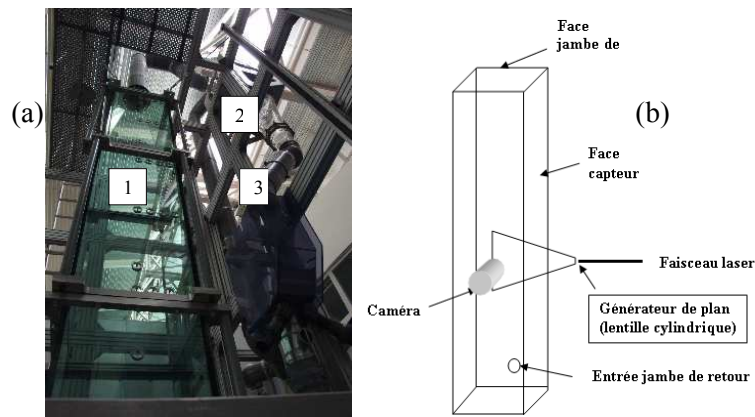
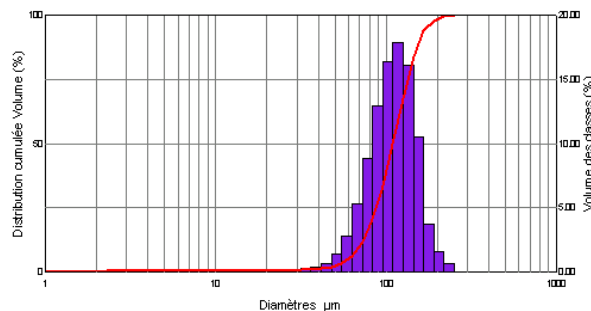


FIG. 1 – a) Dispositif expérimental. b) Schéma de principe de la PIV.

FIG. 2 – Distribution granulométrique de la phase solide. $d_p = 109 \mu\text{m}$, $\sigma = 8 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$

Ces champs de vitesses des particules sont obtenus sur des sections verticales planes de $0.25 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$ ($1/2$ largeur de colonne) de manière à en extraire des profils horizontaux. Les Δt entre deux flashes lasers pour optimiser la corrélation était de l'ordre de $1000 \mu\text{s}$.

3 Résultats et discussion

En se basant sur l'étude [9] disant que la vitesse moyenne du gaz augmente en présence des particules, et les études [6, 7] disant que la concentration moyenne des particules augmente lorsque l'on augmente la masse chargée en particules, on peut déduire que la vitesse moyenne du gaz augmente aussi lorsque l'on augmente la masse chargée en particules, et par la suite les vitesses des particules aussi augmentent ainsi que leurs écarts types en acceptant que le nombre de chocs augmente lorsque ces dernières augmentent. Notons que l'étude [9] a été réalisée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud, et les auteurs n'ont pas pu relever les vitesses du gaz à la paroi. Donc ce raisonnement est juste lorsqu'on est loin de la paroi. La formation de la structure cœur-anneau, où un flux de solide montant en moyen loin de la paroi (cœur) et un autre descendant en moyen près de la paroi (anneau), est un caractère des écoulements dans le lit fluidisé circulant [1, 2]. Cela résulte de la vitesse du gaz faible à la paroi, où les particules tombent en paquet sous l'effet de la gravité. En tenant en compte que la concentration globale augmente corrélativement avec la masse chargée en particules, cela veut dire que le nombre de particules accumulées à la paroi augmente, et on peut prévoir que la vitesse moyenne des particules à la paroi augmente en valeur absolue. Une autre chose importante c'est que Cet effet devient beaucoup plus important pour des grandes valeurs de vitesse superficielle du gaz U_g et disparaît pour des faibles valeurs ($U_{gm} = 2.75 \text{ m/s}$, pour des particules solides de bronze, $d_p = 180 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$. Kehlenbeck et al [7]).

Nos efforts ont porté sur l'étude de l'influence de la masse chargée en particules sur la structure moyenne du mouvement des particules, à une vitesse superficielle de l'air relativement faible, $U_g = 0.41 \text{ m/s}$, avec des particules de verre, $d_p = 109 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$. Pour trois masses chargées en particules (10, 25, et 40 kg), nous avons relevé les profils de vitesses moyennes des particules et leurs écarts types, sur trois hauteurs de la colonne, respectivement : $z/H = 0.35$, $z/H = 0.5$ et $z/H = 0.85$. Nous présentons donc d'abord l'évolution des profils de vitesse avec la hauteur, puis l'influence de la masse chargée sur ceux-ci.

La campagne de mesure ayant pour but l'étude de la faisabilité de mesure PIV en lit fluidisé circulant. Une

comparaison est faite avec l'étude de Van del Moortel [11] qui a travaillé en LDV avec une maquette de plus petite dimension mais ayant le même rapport d'aspect. La comparaison est faite sur les profils moyens et les écarts types de vitesse axiale. Pour des billes de verre de $55 \mu\text{m}$ et une vitesse superficielle de l'air $U_g = 0.35 \text{ m/s}$, des vitesses axiales négatives sont observées par [11] à la paroi, avec une diminution de la valeur absolue en fonction de la hauteur du lit (Figure 4a)). Les vitesses maximales sont observées approximativement à la même position radiale pour les quatre hauteurs étudiées : $r/D = 0.95$. On remarque une légère augmentation de la vitesse axiale des particules au centre de la colonne avec la hauteur.

Les mêmes effets sont observés dans notre étude en ce qui concerne la valeur des vitesses négatives à la paroi (figure 3a), qui est le caractère marquant des écoulements dans les lits fluidisés circulant ou ce qu'on appelle la structure cœur-anneau [1, 2]. Un léger déplacement de la position de la vitesse maximale vers la paroi avec la hauteur est observé. La pente du profil de vitesse en allant vers le centre de la colonne est, pour les trois hauteurs, plus régulière que celle de Van den Moortel [11] qui montre une diminution brusque puis un profil quasi-plat. Les différences observées au centre et au niveau de la vitesse maximale, entre nos résultats et ceux de Van den Moortel [11] peuvent être attribuées aux diamètres différents des deux colonnes [3] et à la différence entre sa fonction de distribution en tailles des particules et la notre [4]. En ce qui concerne les écarts types (figure 3b et 4b), on observe dans la présente étude comme Van den Moortel [11] une diminution globale des écarts types des vitesses axiales avec la hauteur relative ainsi qu'un maximum de fluctuations dans la zone de fort gradient proche de la paroi.

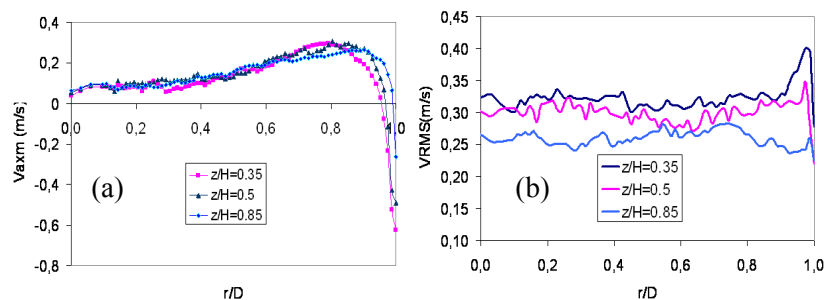


FIG. 3 – Influence de la hauteur sur : a) vitesses axiales des particules, b) les écarts types des vitesses axiales des particules. $U_g = 0.41 \text{ m/s}$, $m = 40 \text{ kg}$

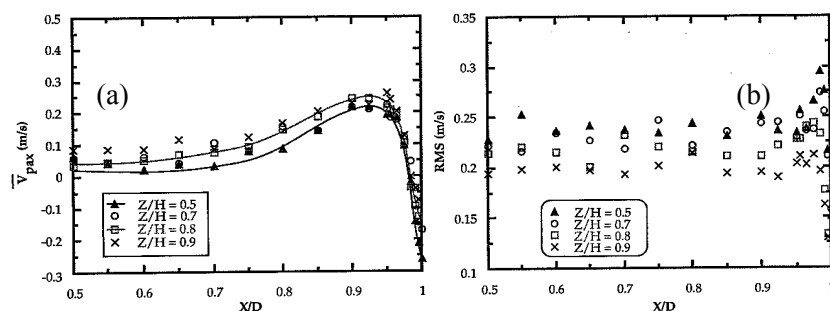


FIG. 4 – Influence de la hauteur sur : a) vitesses axiales des particules, b) les écarts types des vitesses axiales des particules. $U_g = 0.35 \text{ m/s}$, $m = 6 \text{ kg}$, $d_p = 54.5 \mu\text{m}$, $D = 0.2 \text{ m}$. [12].

Concernant l'influence de la masse chargée en particules, nous avons porté (figure 5a), les profils radiaux des vitesses axiales moyennes des particules pour trois masses, 10, 25 et 40 kg, pour une vitesse superficielle de l'air $U_g = 0.41 \text{ m/s}$ et une hauteur relative $Z/H = 0.35$. Au niveau de la paroi les vitesses sont négatives pour les trois masses, avec une augmentation de leurs valeurs absolues avec la masse chargée comme nous avons prévu. Il n'y a pas de différences notables pour les vitesses maximales et leurs positions par rapport à la paroi. Les écarts-types des vitesses axiales moyennes, par contre, semblent augmenter avec la masse chargée (figure 5b).

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que lorsque la concentration globale de solide augmente dans la colonne, la porosité vue par le gaz diminue et la vitesse globale du gaz augmente [9]. La compétition entre les forces de traînée et l'action de la pesanteur d'intensité croissantes, combinée au nombre de chocs plus important entre les particules, peuvent expliquer l'augmentation des écarts types de vitesse avec la masse

chargée. On observe clairement sur les profils radiaux des vitesses transversales moyennes des particules (figure 5c) un effet de la masse chargée. Des vitesses transversales importantes sont observées pour le cas d'une masse chargée de 10 kg où les particules ont suffisamment d'espace pour se déplacer librement. On note une diminution des vitesses avec 25 kg (cette liberté de mouvement diminue pour une masse plus grande). Enfin, pour 40 kg, les vitesses transversales présentent une inversion difficilement explicable du sens de leur mouvement ($r/D = 0,25$). Une zone de transfert de matière entre le cœur et l'anneau est observée au niveau de la paroi pour les trois masses chargées, et son épaisseur augmente avec la masse chargée.

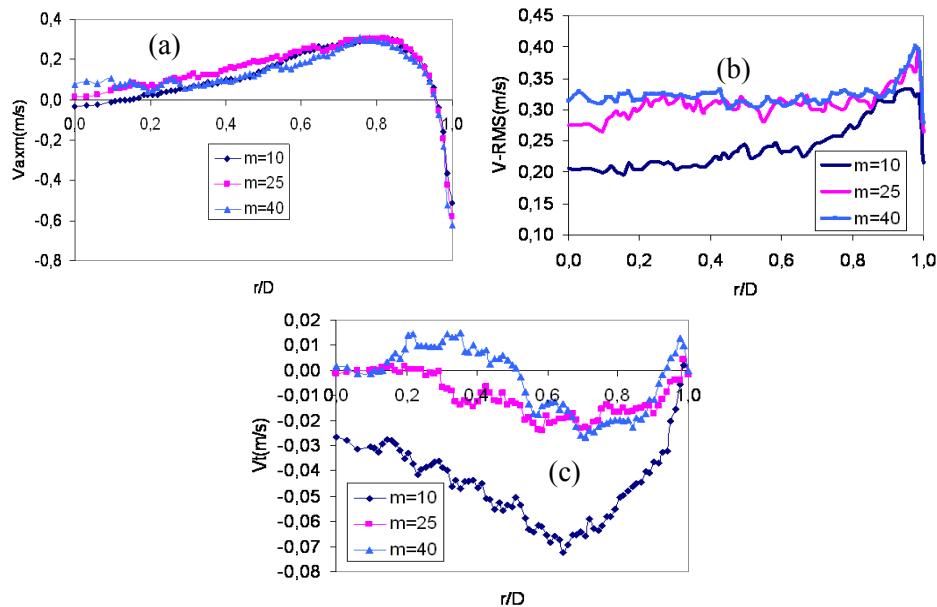


FIG. 4 – Influence de la masse chargée sur, a) vitesses axiales des particules, b) les écarts types des vitesses axiales des particules. c) Vitesses transversales. $U_g = 0.41$ m/s, $z/H = 0.35$

4 Conclusion

Une analyse de la structure de l'écoulement gaz-particules dans une colonne à lit fluidisé circulant a été réalisée à l'aide de la technique de mesure PIV (Particle Imaging Velocimetry). Des profils de vitesse axiale moyenne des particules relevés sur trois hauteurs dans la zone de désengagement et la zone diluée, mettent en évidence l'existence de la structure de la structure cœur anneau (flux de solide montant au centre et un autre descendant près de la paroi) caractérisant ce type d'écoulement. Ensuite, les vitesses axiales et transversales moyennes des particules et leurs écarts types ont été relevés et analysés pour une hauteur relative $z/H = 0.35$ et ceci pour trois masses chargées en particules, respectivement de 10, 25 et 40 kg. Ces résultats ont montré l'existence d'une zone de transfert de matière entre le cœur et l'anneau, où son épaisseur croît avec la masse chargée; et une augmentation en valeur absolue des vitesses axiales moyennes des particules est observée à la paroi en fonction de la masse chargée.

References

- [1] Zhou J., Grace J. R., Lim C. J., Brerton C. M. H., 1995, Particle velocity profiles in a circulating fluidized bed of square cross-section, *Chemical Engineering Science* 50 (1995) 237-244.
- [2] Malcus S., Cruz E., Rowe C., Pugsley T.S., 2001, Radial solid mass flux profiles in a high-suspension density circulating fluidized bed, *Powder Technology* 125 (2002) 5–9.
- [3] Xu G., Nomura K., Nakagawa N., Kato K., 2000, Hydrodynamic dependence on riser diameter for different particles in circulating fluidized beds. *Powder Technologie* 113 (2000) 80-87.
- [4] M'chergui A., 1997, Etude expérimentale de l'hydrodynamique d'un lit fluidisé gaz-particules analyse des instabilités et des mécanismes d'entraînement, Thèse de l'Université de Provence.
- [5] Lewis W. K., Gilliland E. R., Lang P. M., 1962, Entrainment from fluidized beds, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser* 38 (1962) 58-65.
- [6] Masten J. M., Mechanisms of choking and entrainment, 1982, *Powder Technology*. 32 (1982) 21.
- [7] Kehlenbeck R., Yates J., R. Di Felice, H. Hofbauer, R. Rauch, 2001, Novel scaling parameter

for circulating fluidized bed, *AIChE Journal* 49 (2001) 3.

[8] Tsuji Y., Morikawa Y., Shiomi H., 1984, LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *J. Fluid. Mech.* 139 (1984) 417-434.

[9] Moran J. C., Glicksman L. R., 2002, Mean and fluctuating gas phase velocities inside a circulating fluidized bed, *Chemical Engineering Science* 58 (2003) 1867 – 1878.

[10] Zhang Y., Arastoopour H., 1995, Dilute fluidized cracking catalyst particles-gas flow behaviour the riser of a circulating fluidized bed, *Powder Technology* 84 (1995) 221-229.

[11] Van den Moortel T., *Analyses locales des structures d'écoulements gaz-particules dans un lit fluidisé circulant*, 1998, thèse de l'Université de Provence.