

Etude expérimentale et numérique d'un écoulement diphase gaz-particules

M. A. MERGHENI¹, S. YON², J. C. SAUTET², G. GODARD², H. BEN TICHA³, S. BEN NASRALLAH

¹LMEEVED, Centre des Recherches et des Technologies de l'Energie
Borj Cedria, 2050 Hammam-Lif, Tunis.

²Complexe de Recherche Interprofessionnelle en Aérothermochimie
CORIA, UMR 6614 CNRS BP-12, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France

³LESTE, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 5019 Monastir, Tunisie
mohamed-ali.mergheni@coria.fr

Résumé

Dans ce travail, une étude numérique et expérimentale est réalisée dans un jet diphase turbulent (gaz-particules) issu d'un brûleur coaxial. Le modèle numérique repose sur une approche eulérienne-lagrangienne permettant une description fine des mécanismes d'interactions entre les deux phases. La technique d'Anémométrie à Phase Doppler (PDA) est utilisée pour mesurer la taille et la vitesse simultanément de particules solide sphériques de diamètre du 102 μm jusqu'à 212 μm . La comparaison des résultats devrait permettre de qualifier et quantifier la modification de la turbulence de la phase principale induite par la présence de particules solides.

Abstract

In this work, a numerical and experimental study is performed in a two-phase turbulent jet (gas-particles) from a coaxial burner. The numerical model is based on an Eulerian-Lagrangian approach allows a fine description of mechanisms of interaction between the two phases. The technique of phase Doppler anemometry (PDA) is used to measure the size and speed simultaneously solid spherical particles with a diameter of 102 microns to 212 microns. Comparing the results should help qualify and quantify the change in the turbulence of the main phase induced by the presence of solid particles.

Mots clefs

écoulement diphase; PDA ; approche eulérienne-lagrangienne; modulation de la turbulence

Introduction

Les écoulements diphases types gaz-particules interviennent dans les procédés industriels et apparaissent aussi dans les processus naturels. Comme exemples, nous pouvons citer la combustion de charbon pulvérisé, les lits fluidisés circulant ou les jets divers.

Dans ce travail, une étude expérimentale et numérique est réalisée dans un écoulement diphase issu d'un brûleur coaxial. Actuellement aucune technique de mesure autre les diagnostics optiques utilisant la source laser, n'est capable de mesurer les vitesses sans perturber l'écoulement. Pour cette raison, la technique d'anémométrie à phase doppler (PDA) est utilisée, elle permet d'effectuer simultanément la mesure locale et instantanée de la vitesse et de la taille d'une particule.

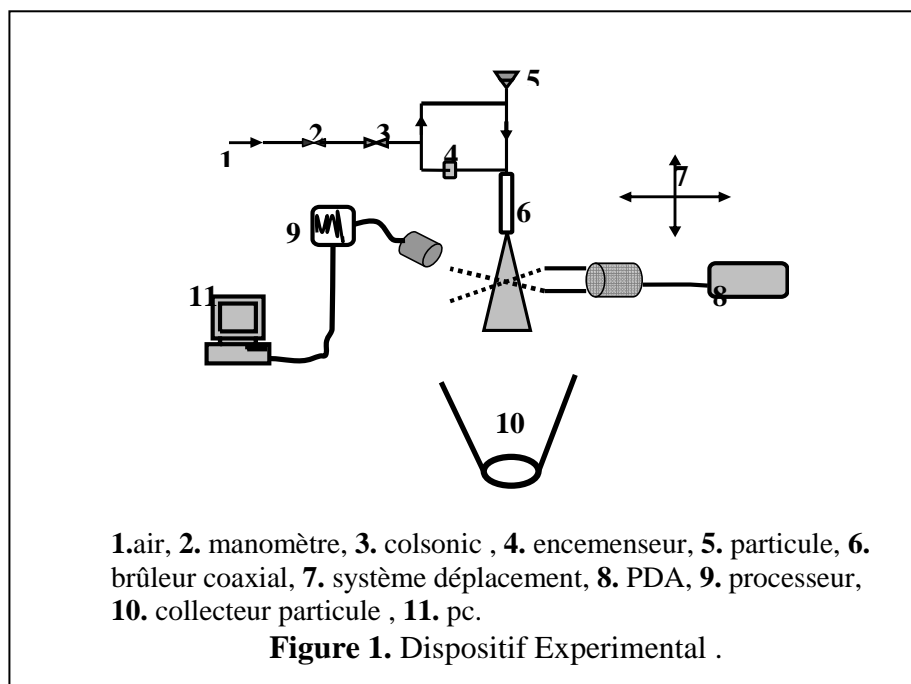
Historiquement, des efforts considérables concernant des prédictions numériques ont été faits, où les méthodes peuvent être divisées dans deux catégories principales, à savoir l'approche Eulérienne et l'approche Lagrangienne. Dans l'approche Eulérienne la phase dispersée est traitée comme continue Simonin et al. [1]. L'approche lagrangienne prédit le mouvement de particules dans la phase continue en résolvant l'équation du mouvement de particules directement Berlemont et al [2]. Dans ce travail en adoptant une approche Eulérienne-Lagrangienne, la phase fluide est calculée par la résolution des équations de Navier-Stokes en

tenant compte des termes sources dû à la présence de particules. La phase dispersée est simulée par une approche Lagrangienne, les particules sont suivies une à une, en résolvant leurs équations de trajectoires. Le paragraphe 1 décrit le dispositif expérimental mis en place au laboratoire **CORIA**, la méthode de mesure utilisée et enfin les traitements des données expérimentales. Le paragraphe 2 est consacré à la mise en équations de la phase continue et de la phase dispersée. Les résultats des mesures et numériques sont présentés dans la section 3, qui portent les modifications que la présence de la phase dispersée va engendrer sur la turbulence de la phase continue dans deux cas différents (conf_1 et conf_3).

1 Dispositif expérimental, diagnostic de mesure et traitements

1.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est schématisé dans la figure 1. Ce dispositif est composé d'un brûleur coaxial et d'un ensemeur de particules solides. Ce brûleur coaxial est composé d'un tube interne de diamètre interne $D_i = 6$ mm et d'un tube annulaire de diamètre interne $D_e = 18$ mm. Le tube interne est chanfreiné sur sa partie externe. Les deux tubes sont alimentés en air comprimé. Les vitesses initiales des jets sont U_i et U_e . Le système d'ensemencement de particules solides (des billes de verre de taille comprise entre 100 et 212 μm) a été développé au **CORIA** afin de produire une injection homogène et stationnaire des particules solides dans le jet central. Ce système est constitué d'un réservoir vertical rempli de particules et d'une vis horizontale, entraînée par un moteur à courant continu, permettant le transport des particules solides dans l'écoulement central turbulent. [3].



2.2 Diagnostic de mesure

Le dispositif expérimental est composé d'un laser argon ionisé et un système de mesure PDA à deux composantes Dantec. Ce dernier est constitué d'une part d'une optique de transmission laser avec beam expander, et d'autre part d'une optique de détection associée à 4 photo multiplicateurs, reliés à une unité de traitement du signal PDA Dantec 58N81, commandée depuis un PC d'acquisition à l'aide du logiciel BSA Flow Software V2.12. Nous travaillons avec une chaîne PDA Dantec à deux couleurs. La focale de la lentille pour l'émission est de 600mm et la focale de réception est de 310mm. Les volumes de mesures formés par les deux paires de faisceaux sont respectivement $3.34 \times 3.34 \times 0.139 \text{mm}^3$ pour le vert ($\lambda = 514.5 \text{nm}$) et $3.17 \times 3.17 \times 0.132 \text{mm}^3$ pour le bleu ($\lambda = 488 \text{nm}$). Le demi-angle entre les faisceaux est de θ pour les deux couleurs. Le volume de mesure contient dans les deux cas 22 franges, espacées de $6.17 \mu\text{m}$

pour le vert et pour le bleu. Pour chaque paire, un des deux faisceaux est brague à 40 MHz, ce qui permet un défilement de franges et ainsi de mesurer le sens de la vitesse. L'angle hors axe ou d'élévation moyen est de 30° . Cette position permet une analyse de la lumière réfractée par les particules car à cet angle de diffusion, la réfraction est porteuse du maximum d'intensité. Les différentes caractéristiques physiques du volume de mesure sont répertoriées dans le tableau 1.

	Vitesse axiale U	Vitesse radiale V
Couleur des faisceaux	vert	bleu
Ecartement des faisceaux	50mm	
focale de la lentille d'émission	600mm	
focale de la lentille de réception	310mm	
Angle de diffraction	30°	
longueur d'onde λ	514,5nm	488nm
Interfrange	6,17 μ m	6,17 μ m
Nombre de franges	22	22
Diamètre du volume	0,139mm	0,132mm
Longueur du volume	3,34mm	3,17mm
Range vitesse	± 44 m/s	± 4.24 m/s

1.3 Traitement des données

Deux appareils de traitement du signal électrique fourni par le photomultiplicateur (société DANTEC Dynamics) ont été utilisés avec dans un premier temps, un Analyseur de Phase Doppler (PDA, Phase Doppler Analyser), dont seule la fonction de mesure de vitesse était utilisée. Par la suite, l'emploi d'un Analyseur de Bouffées Doppler (BSA, Burst Spectrum Analyser, commandée depuis un PC d'acquisition à l'aide du logiciel BSA Flow Software V2.12), a permis d'obtenir une fréquence d'acquisition beaucoup plus importante. Les appareils assurent un premier traitement du signal électrique après filtrage et amplification du signal de sortie du photomultiplicateur. Des critères de validité du signal en sortie tels que visibilité et amplitude du piédestal (exclusion des particules trop grosses), rapport signal sur bruit (filtre passe-bas) et nombre de franges traversées, constituent une partie du traitement du signal.

2 Simulation numérique

2.1 Phase continue

L'approche eulérienne est utilisée pour décrire la phase continue. Elle consiste à résoudre les équations de Navier Stokes moyennées, en y associant un modèle de fermeture de type $(\kappa - \varepsilon)$. L'écoulement est supposé stationnaire, axisymétrique et incompressible. Le système d'équations à résoudre pour la phase fluide, s'écrit sous forme générale de la manière suivante [4]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V \Phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r}) + S_\Phi + S_p^\phi$$

Φ est une grandeur quelconque associée à la phase continue; Γ_Φ et S_Φ représentent, respectivement, le coefficient de diffusion et le terme source correspondants et S_p^ϕ est un terme source additionnel lié à la présence des particules.

ρ , représente la densité de gaz. Les U et V, représentent les composantes de vitesse axiale et radiale; κ est l'énergie cinétique turbulente et ε son taux de dissipation.

2.2 Phase dispersée

Dans le cadre de l'approche lagrangienne, la phase particulaire est simulée en effectuant le suivi lagrangien, d'un grand nombre de particules discrètes, au sein du champ fluide déterminé précédemment. Le suivi lagrangien est basé sur le principe fondamental de la dynamique, en incluant la force de traînée. Dans notre procédure de calculs, les particules, supposées parfaitement sphériques et indéformables, sont suivies individuellement dans l'écoulement gazeux. L'équation de mouvement d'une particule s'écrit :

$$\frac{du_{P,i}}{dt} = \frac{3\rho C_D}{4D_p\rho_p} (u_i - u_{P,i}) |\bar{u} - \bar{u}_P| \quad (2)$$

où u, u_p, C_D, D_p, ρ_p représentent respectivement la vitesse instantanée du fluide, la vitesse instantanée des particules, le coefficient de traînée le diamètre de particule et la densité des particules.

La vitesse instantanée du fluide est décomposée en une valeur moyenne et une valeur fluctuante. La vitesse moyenne est déterminée par la résolution de l'équation moyennée de bilan de la quantité de mouvement. Les

fluctuations turbulentes de vitesses sont déterminées par un modèle stochastique $u' = \zeta \sqrt{\frac{2}{3}} \kappa \cdot \zeta$ est un coefficient stochastique déterminée à l'aide d'un tirage aléatoire.

Le coefficient de traînée est déterminé par la relation suivante :

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & \text{si } Re_p \leq 1000 \\ 0.44 & \text{si } Re_p > 1000 \end{cases} \quad (3)$$

Le coefficient de traînée dépend du nombre de Reynolds de la particule : $Re_p = \rho_p D_p V_{rel} / \mu$ (avec μ la viscosité dynamique). La vitesse relative entre la particule et le fluide est calculée par la relation suivant [8] :

$$V_{rel} = \sqrt{(u - u_p)^2 - (v - v_p)^2}.$$

3. Résultats et discussions

Nous présentons les prédictions des vitesses moyennes et des fluctuations du fluide seul, du fluide chargé en particules et des particules pour les deux configurations (conf_1 et conf_3) et la comparaison avec nos résultats expérimentaux.

Les deux configurations étudiées sont :

<i>Propriétés</i>	<i>Configurations</i>	
	Conf_1	Conf_3
Vitesse du jet central U_i (m/s)	32	7,7
Vitesse du jet annulaire U_e (m/s)	6	10
Rapport des vitesses $ru=U_i/U_e$	5,33	0,77
Nombre de Reynolds : $Re=U_i*Di/\nu$	11637	2800

3.1 Fluide seul

Les évolutions des vitesses moyennes longitudinales (U) le long de l'axe du jet central sont présentées sur la figure 1 pour les deux configurations, obtenues en simulation numérique et expérimentale. Dans le cas conf_1, on remarque que la vitesse axiale suit une décroissance classique : d'abord une faible diminution puis une forte décroissance. En ce qui concerne le cas conf_3, on note d'abord une forte diminution puis une augmentation due à l'entraînement par le jet annulaire et enfin une décroissance moins forte. Les fluctuations de la vitesse longitudinales (u') pour les deux configurations conf_1 et conf_3 sont présentées sur la figure 2. Malgré les quelques différences observées, l'accord est jugé satisfaisant.

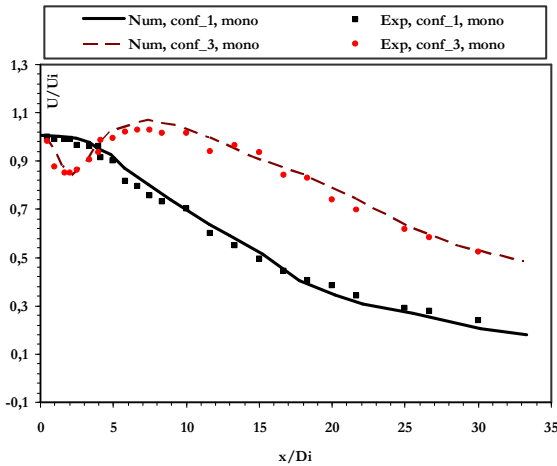


FIG. 1. Profils axiaux des vitesses longitudinales. conf_1 et conf_3

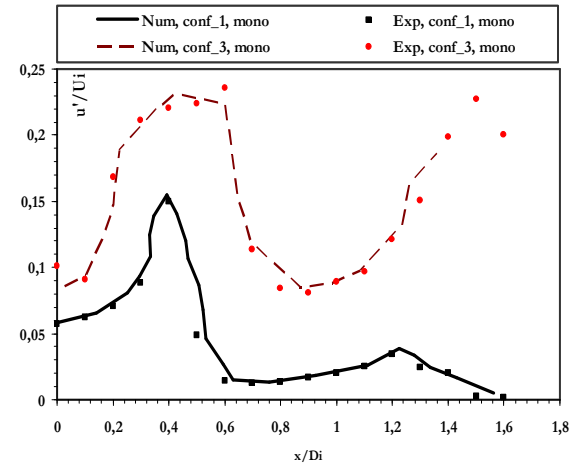


FIG. 2. Profils axiaux des fluctuations des vitesses. conf_1 et conf_3

3.2 Fluide chargé

Nous donnons sur les figures 3 et 4 les profils des vitesses moyennes du fluide chargé et des particules en numérique et expérimentale pour les deux configurations étudiées (conf_1 et conf_3). Les vitesses sont également adimensionnées par la vitesse au centre de la conduite. Les résultats montrent la capacité du code à reproduire le comportement de la phase dispersée. La figure 3 montre que la fusion des deux phases se produit $x/Di=18$ puis les particules deviennent plus rapides que le fluide. Par contre dans le cas conf_3 (figure 4) on n'observe pas la fusion entre les profils des vitesses et on note la phase dispersée reste toujours plus lente que la phase continue.

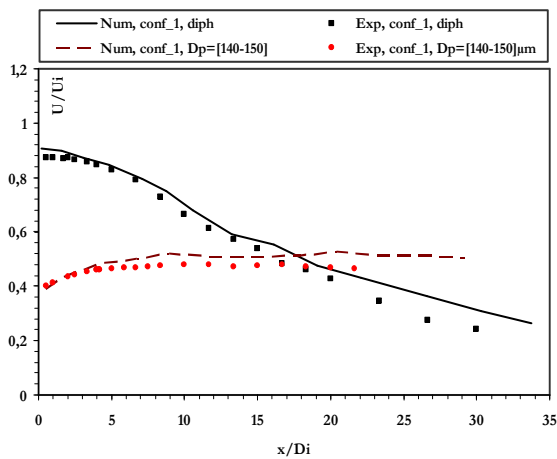


Fig. 3. Profils axiaux des vitesses longitudinales du fluide chargé et des particules. conf_1.

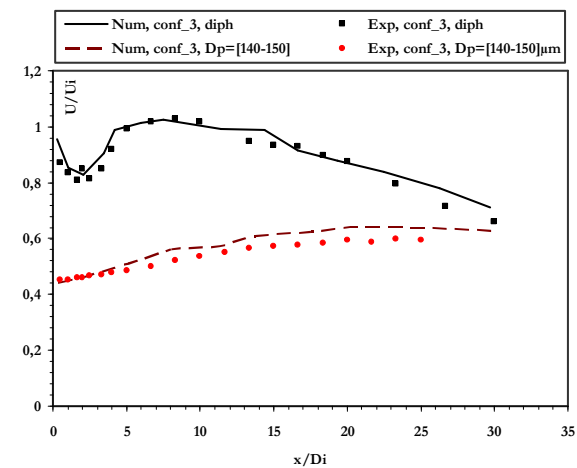


Fig. 4. Profils axiaux des vitesses longitudinales du fluide chargé et des particules. conf_3.

3.4 Modification de la turbulence par des particules

Les fluctuations des vitesses longitudinales juste à la sortie du brûleur ($x/Di=0,5$) et pour les configurations conf_1 et conf_3 sont présentées sur les figures 5 et 6 Ces résultats concernent le cas sans particules et avec particules en numérique et expérimentale.

D'après plusieurs études numériques le terme source de l'énergie cinétique turbulente, induit par la présence des particules, résulte de deux contributions. La première correspond aux fluctuations de vitesse produites

par le sillage des particules, c'est la pseudoturbulence. La deuxième correspond à la modification des fluctuations de vitesse de l'écoulement fluide turbulent, c'est la modulation de la turbulence.

La figure 5 (conf_1, $ru=5.33$) montre clairement que la présence des particules amplifie la turbulence du fluide. On peut alors penser que les deux contributions s'ajoutent. Par contre, sur la figure 6 (conf_3, $ru=0.77$) on remarque une atténuation de la turbulence par la présence des particules. Il semble ainsi que les deux contributions agissent en sens opposés.

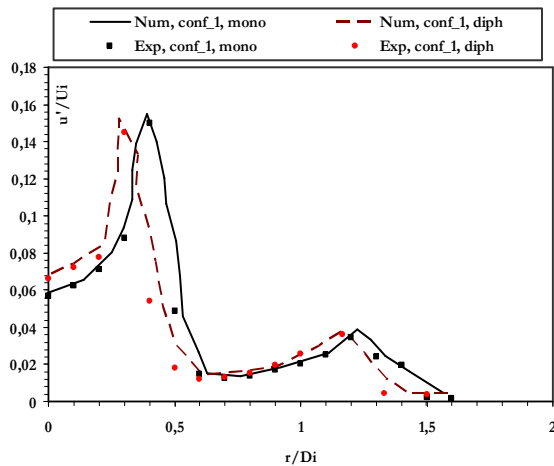


Fig. 5. Profils radiaux des fluctuations longitudinales du fluide en mono et en diphasique et des particules, conf_1 à $x=0,5D_i$.

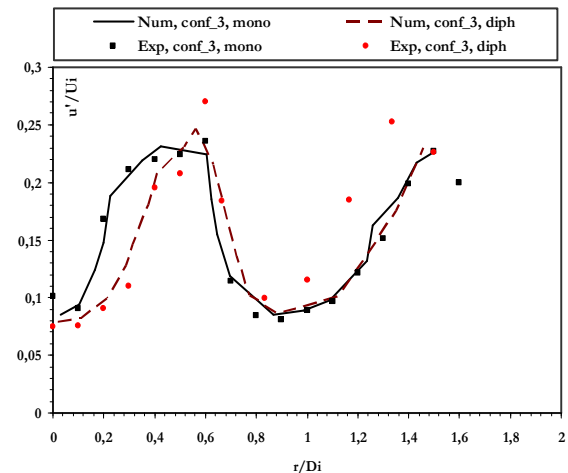


Fig. 6. Profils radiaux des fluctuations longitudinales du fluide en monophasique et en diphasique et des particules, conf_3 à $x=0,5D_i$

Conclusion

Dans ce travail une étude expérimentale est réalisée en utilisant la technique de mesure PDA, une étude numérique est effectuée dont la quelle un code de calcul est développé et les résultats ont montré la capacité du présent code de reproduire les principales caractéristiques d'un écoulement diphasique gaz-particules.

Nous pouvons conclure que la présence de particules solides permet à la turbulence de s'installer plus rapidement au sein du fluide pour un rapport des vitesses supérieur à 1. Lorsque le rapport des vitesses devient inférieur à 1, les particules ont tendances à calmer l'écoulement.

References

- [1] Simonin O., Prediction of the dispersed phase turbulence in particle-laden jets 4th International Symposium On gas-solid flows, Portland 23-26, 1991.
- [2] Berlemont A., Desjonqueres P., Gouesbet G., Particle lagrangian simulation in turbulent flow, International Journal of Multiphase Flow 16, 19-34, 1990.
- [3] Mergheni M. A., Sautet J. C., Godard G., Ben Ticha H., Ben Nasrallah S., Experimental investigation of turbulence modulation in particle-laden coaxial jets using PDA, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 33, 517-526, 2009.
- [4] Mergheni M.A., Interactions particules turbulence dans un jet axisymétrique diphasique turbulent Thèse de doctorat Université de Rouen & Université de Monastir, 2008.
- [5] Gore R. A., Crowe C. T., Effect of particle size on the modulating turbulent intensity, International Journal of Multiphase Flow, 15, 2, 279-285, 1989.