

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
(GEEE-2018)

## **Etude de l'effet des particules sur les paramètres cinétiques de jet diphasique turbulent**

Mariem Bayouhd, Touati Hazem, Ben N'Ticha Hmaied,

Ecole Nationale d'ingénieurs Monastir Rue Ibn El Jazzar 5000 Monastir

[bayouhdmaryam@live.fr](mailto:bayouhdmaryam@live.fr); [touati\\_2001@yahoo.fr](mailto:touati_2001@yahoo.fr); [hmaied\\_benticha@yahoo.fr](mailto:hmaied_benticha@yahoo.fr);

### **Abstract**

Des simulations numériques utilisant un modèle eulérien à deux fluides ont été réalisées pour des jets axisymétriques bidimensionnels issus d'une buse circulaire de 20 mm de diamètre. La taille des particules est comprise entre 30 et 180  $\mu\text{m}$  et la charge de particules varie de 0.1 à 1. Les modulations sur les structures d'écoulement et les caractéristiques turbulentes de l'écoulement de gaz dues aux particules solides avec différentes tailles et taux de chargement de particules sont étudiées. L'étalement du jet et la décroissance de la vitesse moyenne de la ligne centrale sont calculés pour toutes les tailles et taux de chargement de particules considérées dans la présente étude. Les ajouts de particules solides dans le flux de gaz modulent de manière significative la turbulence du gaz dans la buse ainsi que les débits d'écoulement. Les particules fines suppriment la turbulence, tandis que les particules grossières l'améliorent.

**Mots clés :** écoulement diphasique, turbulence, jet diphasique, taux de chargement

### **I. Introduction**

Les écoulements turbulents de gaz particules -solides dans les conduites ont de nombreuses applications allant des systèmes de transport pneumatique aux gazéificateurs de charbon. Ces écoulements sont très complexes et influencés par divers phénomènes physiques, tels que les interactions particule-turbulence, les forces de traînée, gravitationnelles et visqueuses et les forces de portance, etc. Dans ce travail, on se propose d'étudier numériquement le comportement dynamique de l'écoulement et analyser l'effet du taux de chargement en particules sur l'écoulement du gaz et sur la turbulence. . On a adopté une approche eulérienne-eulérienne pour modéliser la phase solide et le modèle k- $\epsilon$

pour modéliser la turbulence. Plusieurs auteurs se sont intéressés par les écoulements diphasiques

**Patro et Al** [1] ont montré que les petites particules atténuent la turbulence, tandis que les plus grosses augmentent la turbulence dans le jet. **Abramovich** [2] a étudié explicitement des jets monophasés turbulents, ronds et symétriques. Les jets ronds et symétriques chargés de particules ont également été étudiés par de nombreuses personnes expérimentalement et numériquement [3-6].

### **II. Modélisation numérique :**

Le modèle numérique résout les équations standards pour la conservation de la masse, de conservation de la quantité de mouvement dans la géométrie d'un brûleur coaxial.

Le modèle k- $\epsilon$  présenté par Launder et Spalding [7] est utilisé pour modéliser l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation de l'énergie cinétique  $\epsilon$ .

Les équations directrices pour une description eulérienne des écoulements gaz-solide dilués et turbulents suivent celles données par Bolio et al [8].

#### **i. Modélisation de la phase fluide :**

##### **• Equation de conservation de la masse :**

$$\bullet \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_f U_{fi}) = 0$$

##### **• Équations de conservation de la quantité de mouvement :**

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha_f \rho_f U_{fi} U_{fj}) \\ = -\alpha_f \frac{\partial P}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_f \mu_f \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \right] \\ \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_f \mu_f \langle U_{fi} U_{fj} \rangle) + \alpha_f \rho_f g_i + S_{pui} \end{aligned}$$

tel que  $S_{pui} = \frac{\alpha_f \rho_p}{\tau_p} (U_{pi} - U_{fi})$

- Equation de d'énergie cinétique turbulente :

$$\begin{aligned} \alpha_f \rho_f U_{fj} \frac{\partial k_f}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_f \rho_f \left( v_f + \frac{v_{tf}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_f}{\partial x_j} \right] - \\ \alpha_f \rho_f \langle U_{fi} U_{fj} \rangle \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_j} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + S_{pk} \end{aligned}$$

tel que

$$S_{pk} = \frac{\alpha_p \rho_p}{\tau_p} \left( |U_{pi} - U_{fi}|^2 + (|k_p - k_f|) \right)$$

- Equation du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente :

$$\begin{aligned} \alpha_f \rho_f U_{fj} \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_f \rho_f \left( v_f + \frac{v_{tf}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_j} \right] - \\ \alpha_f \rho_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} \left[ C_{\varepsilon 1} f_1 \langle U_{fi} U_{fj} \rangle \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon_f \right] + S_{p\varepsilon} \end{aligned}$$

Tel que

$$S_{p\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\kappa} C_3 S_{pk}$$

$$\begin{aligned} \langle U_{fi} U_{fj} \rangle = \frac{2}{3} k_f \delta_{ij} - v_{tf} \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \text{ avec } v_{tf} \\ = C_\mu \frac{\kappa_f^2}{\varepsilon_f} \end{aligned}$$

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.33

tel que les constantes de modèle  $\kappa$ - $\varepsilon$  sont :

ii- Modélisation de la phase particule :

Conservation de nombre des particules :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (n_p U_{pi}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} \right)$$

Conservation de quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (n_p U_{pj} U_{pi}) \\ = n_p g_i + n_p (U_{fi} - U_{pi}) \frac{1}{\tau_{pf}} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ n_p v_p \left( \frac{\partial U_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{fj}}{\partial x_i} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v_p}{\sigma_p} \left( U_{pj} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} + U_{pi} \frac{\partial n_p}{\partial x_j} \right) \right] \end{aligned}$$

Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente :

les grandeurs de turbulence pour la phase solide sont obtenues en utilisant le modèle algébrique de Hinze-Tchen [9] de dispersion de particules discrètes par turbulence homogène.

Les grandeurs turbulentes (telles que l'énergie cinétique turbulente et la vitesse de dissipation turbulente) de la phase solide sont données en fonction des caractéristiques moyennes de la phase gazeuse :

$$\begin{aligned} \kappa_p = \kappa_f * \left( 1 + \frac{\tau_p}{\tau_T} \right)^{-1} \text{ avec } \tau_T = \frac{\kappa_f}{\varepsilon_f} \\ \tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f} \end{aligned}$$

**3. Configuration :**

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

Le jet émerge d'un tube de diamètre 2 cm, avec pour vitesse débitante 12,6 m/s. Il est entouré par un écoulement de confinement co-courant de diamètre 0,6 m, de vitesse 0,05 m/s faible devant la vitesse débitante du jet. A la sortie du tube de longueur 90 fois son diamètre, la turbulence est pleinement développée. La vitesse des billes est proche de celle de l'air si l'on se fie aux mesures de Modarres et al. Des billes de verre sphériques de taille uniforme et de densité de 2990 kg / m ont été introduites dans le jet.

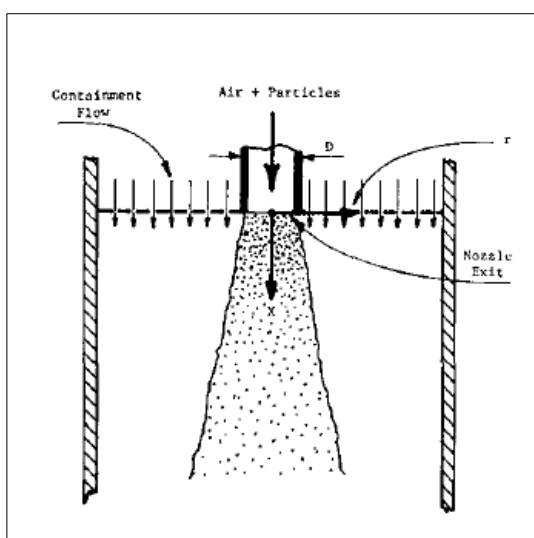


Figure1. Champ d'écoulement autour d'un jet

**Résultats et interprétations**

**1. Validation**

Pour les positions axiales  $X/D=20$  (Figure2.a) et  $X/D=30$  (Figure2.b) et on a représenté les courbes de vitesses radiales ainsi que l'intensité turbulente trouvés.(Figure3.et 4.). Les résultats trouvés montrent un accord satisfaisant avec les mesures expérimentales.

**1. Profil Radiale de vitesse axiale :**

\*pour  $\phi=0.32$   $x/D=20$

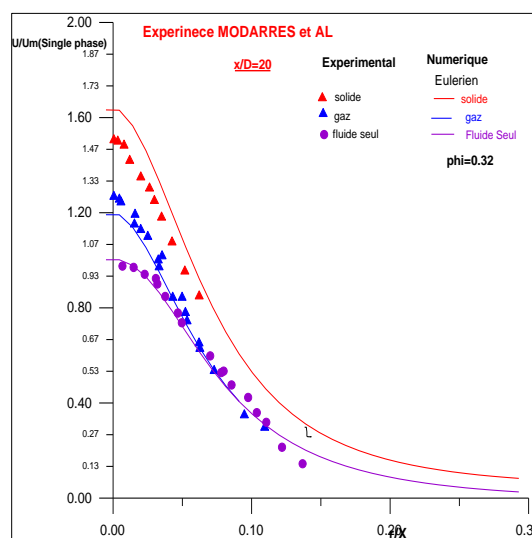


Figure2.a. Profil radial de vitesse axiale à la section  $x/D=20$   
 et pour  $\phi=0.32$

\*pour  $\phi=0.32$   $x/D=30$

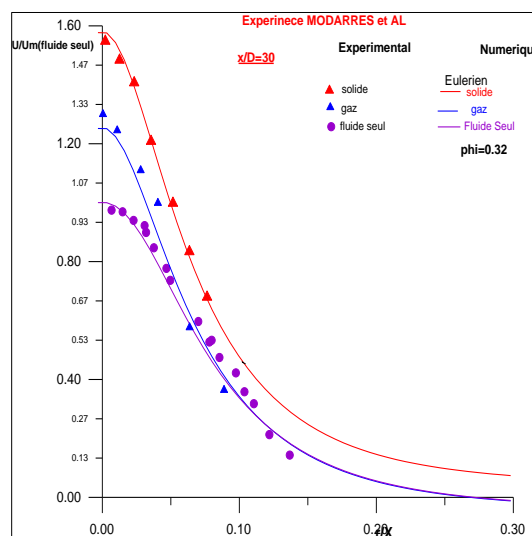


Figure2.b. Profil radial de vitesse axiale à la section  $x/D=30$   
 et pour  $\phi=0.32$

**1. Profil axiale de vitesses : ( $x/d = 20 - \phi_m = 0,32$ )**

**5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)**

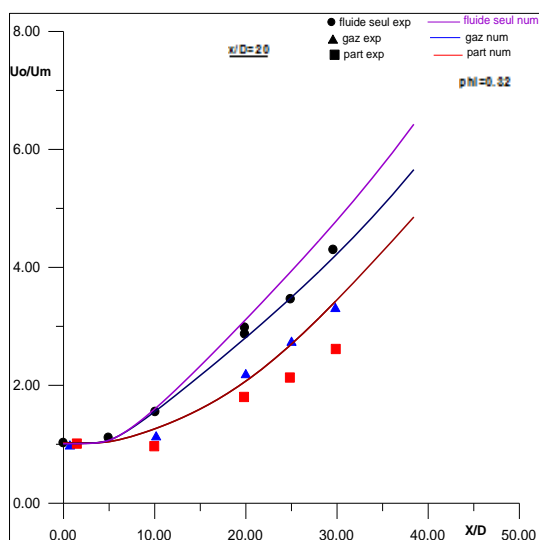


Figure3. Profil axiale de vitesse axiale pour  $\phi=0.32$

2. Profil radiale de l'énergie cinétique turbulente :

$(x/d = 20 - \phi_m = 0,3$

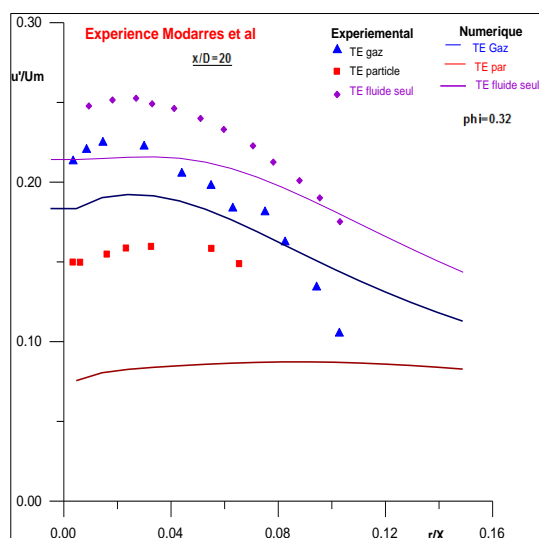
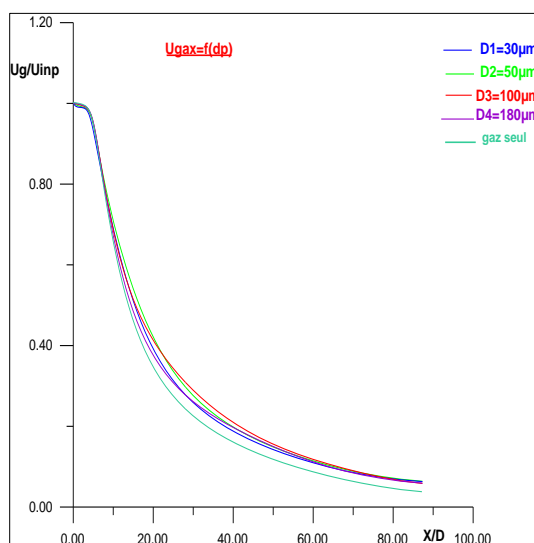


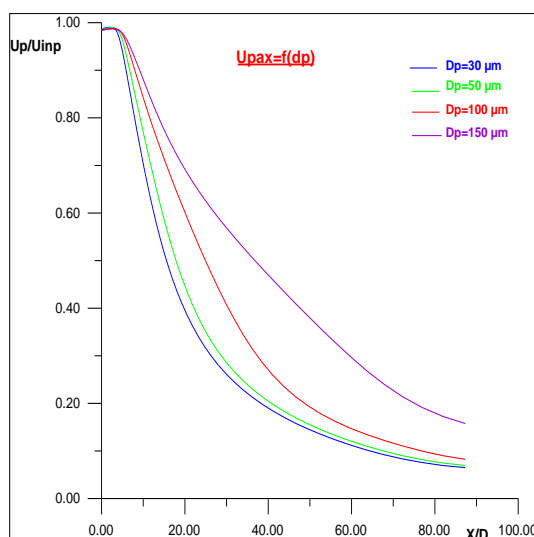
Figure4. Profil radial de l'énergie cinétique turbulente axiale à la section  $x/D=20$  et pour  $\phi=0.32$

**I- Variation de la vitesse axiale le long de la ligne centrale.**

1. Effet de variation de diamètre de la particule :



(a)



(b).

Figure5. Variation de la vitesse de la ligne centrale pour différentes tailles de particules : (a) phase gazeuse et (b) phase solide  $\rho_s = 1000 \text{ kg / m}^3$ ,  $\text{taux}=0.4$

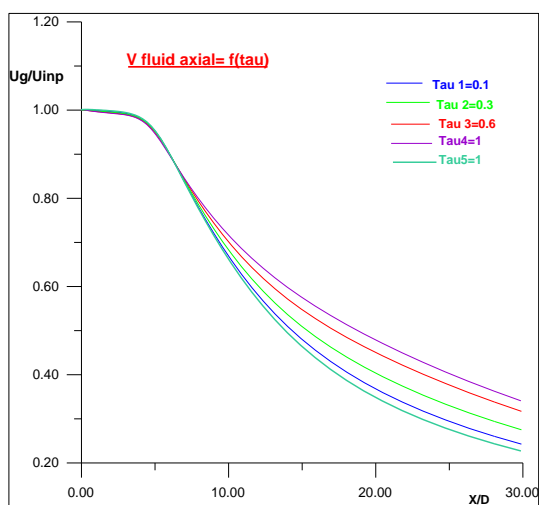
L'effet de la variation des diamètres des particules sur l'écoulement des deux phases est illustré à la figure 5 qui montre l'allure de la vitesse sur l'axe pour différents diamètres des particules..

L'augmentation de la taille des particules augmente le déclin de la vitesse de la phase gazeuse et diminue la vitesse de décroissance de la vitesse de la phase solide le long de la ligne centrale. Les

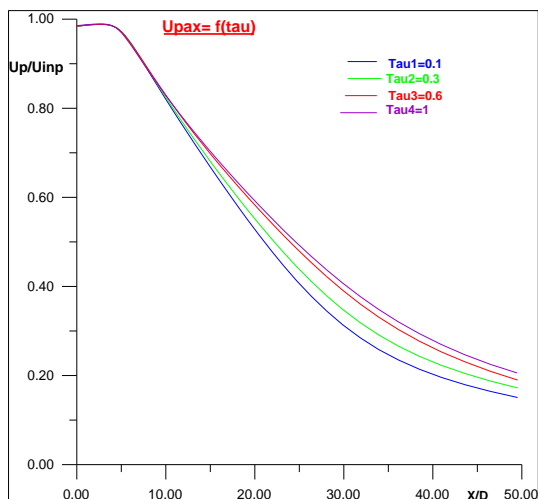
5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

particules les plus lourdes se dispersent lentement le long de la direction radiale, en raison de l'inertie, et par conséquent, la plupart d'entre elles sont distribuées près de la ligne médiane du jet. Ceci obstrue le mouvement du fluide près de la région centrale et la vitesse du gaz diminue.

Effet de la variation du taux de chargement :



(a)



(b)

Figure6. Variation de la vitesse de la ligne centrale pour différents taux de chargements de particules : (a) phase gazeuse et (b) phase solide  $\rho_s=1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_p=50 \mu\text{m}$

La figure 6 montre l'influence du taux de chargement sur la décroissance axiale de la vitesse moyenne. On constate que le taux de décroissance de la vitesse axiale devient lent à mesure que le taux de chargement augmente. Les grands tourbillons produits par l'air entraîné se divisent en tourbillons plus petits lorsque le taux de chargement d'une taille fixe des particules augmente [10]. Ainsi, l'énergie turbulente associée à ces tourbillons est atténuée. Par conséquent, avec une grande charge de particules, l'échange de quantité de mouvement entre les phases devient minimal. Par conséquent, le taux de décroissance de la vitesse est ralenti.

**II-Distribution radiale des profils de vitesse :**

**Effet du taux de chargement.** La figure 7 présente l'effet de taux de chargement sur la vitesse moyenne à  $X/D=20$  pour des particules de  $50 \mu\text{m}$ . La vitesse axiale des deux phases croît en augmentant le taux de chargement, cette croissance est plus nette pour la phase gazeuse. Il en résulte un jet plus étroit que le jet monophasé.

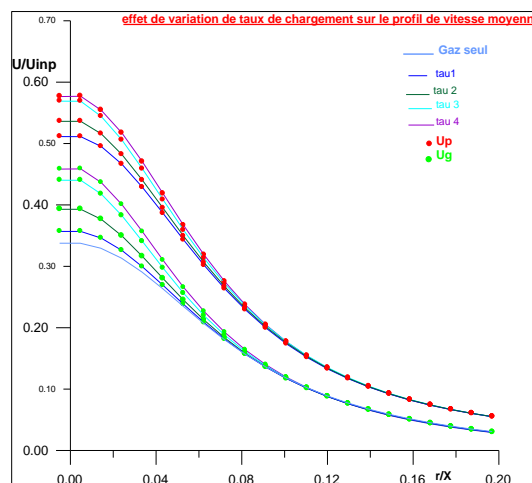


Figure7. Effet du taux de chargement sur les profils de vitesse moyenne à  $X/D=20$ ,  $d_p=50 \mu\text{m}$  et  $U_m=10 \text{ m/s}$ ,  $\rho_p=1020 \text{ Kg/m}^3$

**L'intensité turbulente :**

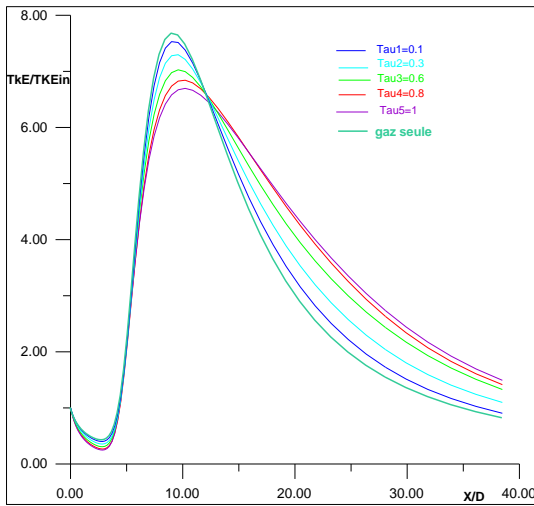
La fluctuation de la turbulence est supposée être isotrope dans le modèle  $k-\epsilon$ . Pour quantifier la modification de la turbulence due à l'addition de particules, on va utiliser le pourcentage de modulation de turbulence (TM) est calculé comme :

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
 (GEEE-2018)

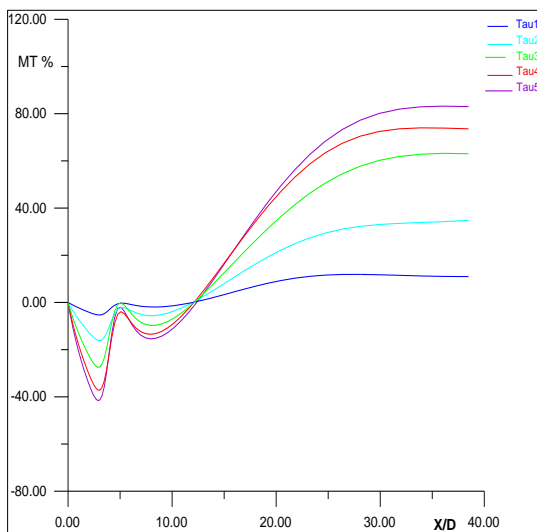
$$\text{Pourcentage TM} = \frac{K_{g,TP} - K_{g,SP}}{K_{g,SP}} \times 100$$

Les indices TP et SP se réfèrent au flux diphasique et au flux monophasé, respectivement. Une valeur positive pour le pourcentage TM indique une amélioration de la turbulence, tandis qu'une valeur négative indique une atténuation de la turbulence.

**1. Effet du taux de chargement sur l'intensité turbulente**



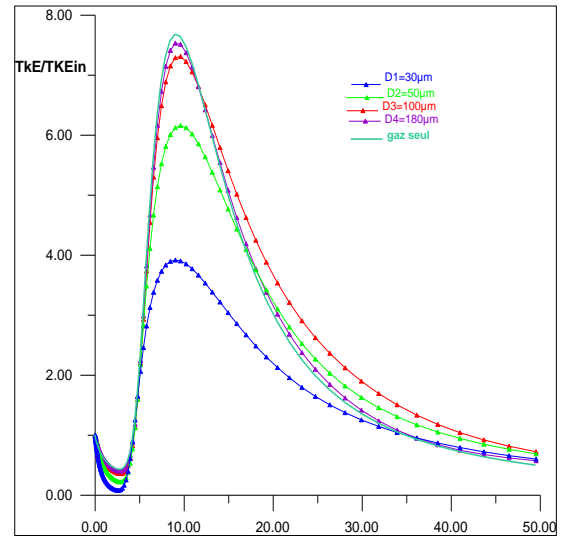
(a)



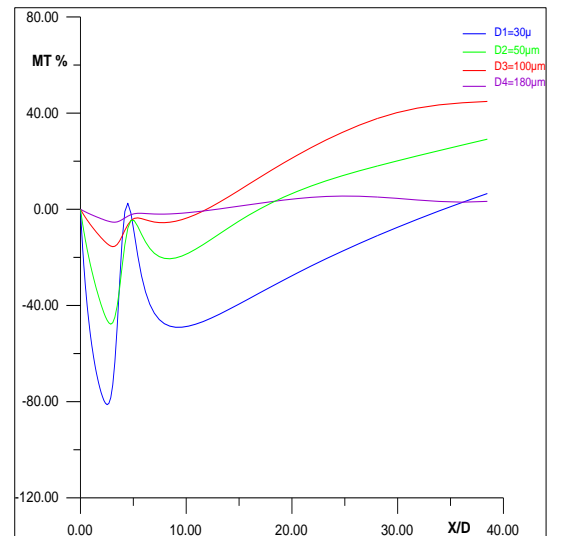
(b)

Figure8. Variations pour différents taux de chargement des de particules de (a) énergie cinétique turbulente et (b) modulations turbulentes sur la ligne centrale en

fonction de la distance axiale,  $\rho_s = 3000 \text{ kg / m}^3$ ,  $d_p = 50 \mu\text{m}$



(a)



(b)

Figure9. (a) énergie cinétique turbulente et (b) modulations turbulentes le long de la ligne centrale,  $\rho_s = 1000 \text{ kg / m}^3$ ,  $\text{Taux} = 0.4$

La distribution axiale de l'énergie cinétique turbulente, normalisée par sa valeur initiale, est présentée aux Fig. 8 (a) et 9 (a) pour différentes tailles de particules et taux de chargement. On observe que, après une diminution initiale due au développement du jet, l'énergie cinétique turbulente augmente fortement et diminue ensuite.

Le résultat en monophasé est également représenté sur la

5th International Conference on Green Energy and Environmental Engineering  
(GEEE-2018)

figure 9 (a). Les petites particules dissipent la turbulence plus que les grosses particules. Ceci est lié à une augmentation significative de l'échelle de longueur turbulente intégrale avec le diamètre des particules.

D'après la figure 9 (a), on peut voir qu'avec l'augmentation du taux de chargement, l'énergie cinétique turbulente diminue dans la région du développement de l'écoulement pour augmenter ensuite le long de la ligne centrale. Les figures 8 (b) et 9 (b) présentent le pourcentage de modulation de turbulence (TM) dans le jet à deux phases le long de la ligne centrale. On observe que les particules fines (30  $\mu\text{m}$ ) atténuent la turbulence dans toute la ligne centrale.

Les autres particules grossières provoquent une atténuation dans la région en développement (jusqu'à  $X/D=15$ ) et un rehaussement dans la région où l'échelle de longueur intégrale de turbulence ( $L_0$ ) est plus élevée. Une tendance similaire se produit pour différents taux de chargement.

### Conclusion

Une simulation CFD a été effectuée pour un écoulement de gaz turbulent contenant des particules solides dispersées diluées dans une buse agissant dans la direction verticale vers le bas.

Le modèle d'Euler-Euler a été réalisé pour les flux de gaz solide pour différentes tailles et taux de chargements des particules. Le modèle de turbulence  $k-\epsilon$  avec des termes supplémentaires représentant l'effet des particules solides avec la fonction de la paroi log-loi a été utilisé pour la phase gazeuse.

Cette étude a montré que la taille des particules et le taux de chargement sont les deux paramètres qui influencent considérablement l'écoulement diphasique.

Les particules solides ont affecté de manière significative la structure de la turbulence de la phase gazeuse dans la buse. De plus petites particules atténuent la turbulence, tandis que les plus grosses augmentent la turbulence dans le jet.

### Références

[1] **Patro P. and Dash S.** 2014, "Computations of Particle-Laden Turbulent Jet Flows Based on Eulerian Model" *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 136 / 011301-1

[2] **Abramovich, G. N.**, 1963, *The Theory of Turbulent Jets*, MIT, Boston.

[3] **Hedman, P. O., and Smoot, L. D.**, 1975, "Particle-Gas Dispersion Effects in Confined Coaxial Jets," *AICHE J.*, 21, pp. 372–379.

[4] **Modarress, D., Tan, H., and Elghobashi, S.**, 1984, "Two Component LDA Measurements in a Two Phase Turbulent Jet," *AIAA J.*, 22(5), pp. 624–630.

[5] **Crowe, C. T., Gore, R. A., and Troutt, T. R.**, 1985, "Particle Dispersion by Coherent Structures in Free Shear Flows," *Part. Sci. Technol.*, 3, pp. 149–158.

[6] **Hardalupas, Y., Taylor, A. M. P. K., and Whitelaw, J. H.**, 1989, "Velocity and Particle-Flux Characteristics of Turbulent Particle-Laden Jets," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 426, pp. 31–78.

[7] **Lauder et Spalding B.E.** Launder et D. B. Spalding, *The Numerical Computation of Turbulent Flows*, Computer Methods in Mechanics and Engineering, Volume 3, Pages 269-289, 1974.

[8] **Bolio, E. J., Yasuna, J. A., and Sinclair, J. L.**, 1995, "Dilute Turbulent Gas-Solid Flow in Risers With Particle-Particle Interactions," *AICHE J.*, 141(6), pp. 1375–1388.

[9] **Hinze-Tchen J. O.**, 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, New York.

[10] **Gillandt, I., Fritsching, U., and Bauckhage, K.**, 2001, "Measurement of Phase Interaction in Dispersed Gas-Particle Two-Phase Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, 27, pp. 1313–1332.