

## ETUDE NUMERIQUE POUR LA VALIDATION DE L'ÉCOULEMENT A L'INTERIEUR D'UN PILOTE EXPERIMENTAL DE LIT FLUIDISE CIRCULANT DE GRANDE DIMENSION

A. Zaabout<sup>1,2\*</sup>, H. Bournot<sup>2</sup>, B. Kharbouch<sup>1</sup>, R. Occelli<sup>2</sup>, A. Draoui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Energétique, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc

<sup>2</sup> IUSTI - UMR 6595, Aix-Marseille Université, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille, France  
[zaabout\\_abdelghafour@yahoo.fr](mailto:zaabout_abdelghafour@yahoo.fr), [herve.bournot@univmed.fr](mailto:herve.bournot@univmed.fr)

### RESUME

Cette étude numérique est une étude de caractérisation et de validation d'un dispositif de lit fluidisé circulant (LFC) de grande dimension à l'échelle du laboratoire (hauteur : 5m), installé au laboratoire IUSTI à Marseille . Ce travail fait suite à une étude expérimentale antérieure, s'appuyant notamment sur la technique LDV (Laser Doppler Velocimetry) qui avait montré une perturbation anormale de l'écoulement diphasique dans la colonne de fluidisation. Il a donc été fait le choix d'utiliser l'outil numérique pour simuler l'écoulement tridimensionnel complet dans le dispositif, c'est à dire à la fois dans la colonne de fluidisation mais aussi dans le cyclone et dans la boucle de retour (Figure. 1). De ce fait, au moyen du logiciel FLUENT, nous avons pu, d'une part confirmer les phénomènes de recirculation non désirés mis en évidence par la LDV et d'autre part trouver leurs origines. Nous avons ensuite proposé une solution technologique pour stabiliser l'écoulement dans la colonne de fluidisation ; l'uniformité des vitesses du gaz dans la colonne étant, bien sur, le paramètre primordial pour pouvoir envisager par la suite des campagnes de mesures sur ce lit.

### NOMENCLATURE

$C_2$ : Facteur de résistance à l'inertie	(1/m)
$e$ : Epaisseur du poreux	(m)
$Q$ : Débit du fluide	(l/h.cm <sup>2</sup> )
$p$ : Pression	(Pa)
$u$ : Vitesse du fluide	(m/s)
$\alpha$ : Perméabilité du milieu poreux	(m <sup>2</sup> )
$\beta$ : L'inverse de la perméabilité du milieu poreux	(1/m <sup>2</sup> )
$\partial$ : Facteur de résistance à l'inertie	(1/m)
$\rho$ : masse volumique du fluide	(kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$ : Viscosité dynamique	(Pl)

### 1. INTRODUCTION

Actuellement, dans le contexte particulier de la préservation de l'environnement et de la diminution des ressources énergétiques les systèmes industriels utilisant la technologie des lits fluidisés se développent de plus en plus. Les lits fluidisés sont employés dans un large domaine d'applications industrielles telles que les chaudières pour la production de l'énergie, les réacteurs chimiques, la calcination des minerais, l'enrobage de particules, etc. Pour concevoir de manière optimale un lit fluidisé, la dynamique du mélange doit être bien comprise, puisqu'elle influe directement sur les performances de ce dernier. Cependant le comportement hydrodynamique des lits fluidisés circulant a été très étudié après le succès du développement de la première unité de craquage catalytique du fluide (FCC) aux Etats-Unis en 1938. Les travaux se sont concentrés le plus souvent sur le comportement de la phase solide, en déterminant les profils axiaux et radiaux des concentrations de

solide dans la colonne [1, 2], les profils radiaux de la vitesse axiale des particules [3, 4, 5], les profils radiaux des taux de solides en circulation [6, 7], ainsi que sur le caractère fluctuant des écoulements dans les LFC [8]. D'autres travaux ont étudié le comportement de la phase gazeuse en présence des particules [9], les vitesses de glissement entre la phase gazeuse et la phase solide [10]. Le dispositif classique d'une installation à LFC comprend (figure. 1): une colonne de fluidisation ou principale (1) , un cyclone (2) situé en haut de celle-ci pour la séparation du mélange gaz-solide, et une jambe de retour (3) qui joint ces deux éléments. Généralement, pour la plupart des études citées au dessus, les dispositifs expérimentaux utilisés ont la jambe de retour liée à la colonne de fluidisation dans une position en bas de cette dernière, juste au dessus de la position du poreux (figure.2.a). Dans ce cas en alimentant le dispositif en air, on aura une quantité d'air qui passe par la jambe de retour, que ce soit pour les installations qui fonctionnent en surpression (l'air soufflé par le bas), ou par dépression (aspiration en sortie), causant ainsi une dissymétrie de l'écoulement de l'air dans la colonne et par la suite une perturbation de l'écoulement du mélange. De ce fait la connaissance du comportement du fluide seul à l'intérieur du dispositif est nécessaire pour un bon fonctionnement de l'installation et pour améliorer la compréhension des phénomènes mis en jeu lors du mouvement du mélange. Dans ce but et pour se rapprocher de la taille des installations industrielles, le laboratoire IUSTI a mis en route un lit fluidisé circulant de grande dimension (5 m de hauteur et 0.5 m de largeur) sur lequel on propose de réaliser une étude numérique de l'hydrodynamique de l'écoulement de l'air seul, à l'aide du code de calcul commercial FLUENT. L'objectif est de déterminer le comportement de l'écoulement du gaz à l'intérieur de l'installation et surtout dans la colonne de fluidisation. Dans un deuxième temps on cherchera à stabiliser l'écoulement dans la colonne par modification de la géométrie de l'installation.

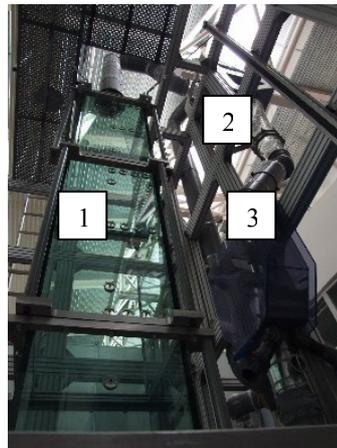


Figure 1. Dispositif expérimental

### 3.EQUATIONS DE MOUVEMENT

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (i= 1, 2,3) \quad (\text{fluide incompressible}) \quad (1)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho u u_i\right) \text{ (au niveau du poreux)} \\ S_i = 0 \text{ (Ailleurs)} \end{cases}$$

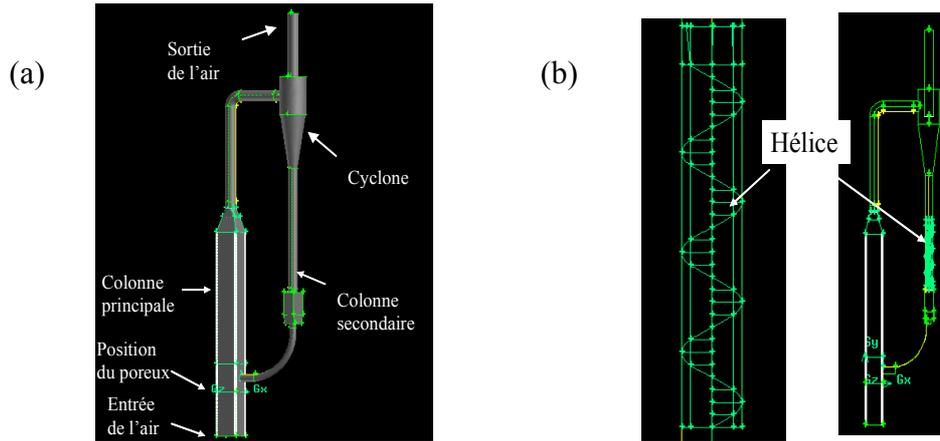


Figure 2. Géométrie 3D créée à l'aide du logiciel Gambit. **a)** jambe de retour sans hélice. **b)** jambe de retour avec hélice.

#### 4 .ETUDE NUMERIQUE

Nous avons choisi le code de calcul Fluent pour réaliser nos calculs. La géométrie et le maillage ont été établie sous le logiciel Gambit. Afin de valider l'ensemble des paramètres de fonctionnement et d'obtenir des premiers résultats avec un minimum de temps de calcul, des simulations en deux dimensions ont été réalisées comme une première étape du travail. Ensuite la géométrie réelle en trois dimensions a été simulée. Nous avons testé différentes conditions aux limites (injection du fluide par l'entrée, aspiration en sortie et gradient de pression imposé entre l'entrée et la sortie), ainsi que les différents modèles de turbulence disponibles avec le logiciel. Nous ne présentons ici que les simulations en 3D, et le cas d'injection du fluide par l'entrée.

Le gaz utilisé est de l'air, il est considéré comme fluide incompressible et ses propriétés physiques sont :

$$\begin{cases} \mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ Pl} \\ \rho = 1,225 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

Le poreux est en bronze de 3mm d'épaisseur. Un lit de particules fixe d'épaisseur  $e$ , traversé par un débit de gaz  $Q$ , crée une perte de charge totale  $\Delta P$  équivalente au saut de pression donné en millibar par la loi de Forchheimer [11], où  $e'$  est l'épaisseur du poreux en mm,  $\mu'$  la viscosité dynamique du fluide en mPl et  $\rho'$  la masse volumique du fluide en g/l.

$$\boxed{\Delta p' = e' [\partial \mu' Q + \beta \cdot \rho' Q^2]} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \partial = 0,057 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2} \\ \beta = 4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \end{cases}, \text{ des termes spécifiques à notre poreux (données fabricant).}$$

##### 4.1 .Conditions aux limites imposées sous Fluent :

Entrée: Velocity inlet = 0,5m/s.  
Sortie : Outflow.

Modèle de turbulence : (k-ε).

Le saut de pression, est calculé sous Fluent en activant la condition au limite *pressure\_jump* à la position où on veut le calculer (position du poreux figure.2.a). Alors par le biais des 3 coefficients  $\alpha, C_2, e$  qui figurent dans l'équation (5), on calcule cette perte de charge en Pascal.

$$\Delta p = e \cdot \left[ \frac{\mu}{\alpha} u + \frac{1}{2} C_2 \cdot \rho \cdot u^2 \right] \quad (5)$$

Pour une vitesse  $u = 0.5$  m/s, Une comparaison des relations (4) et (5) nous donne les valeurs des paramètres caractéristiques de notre poreux  $\alpha, C_2, e$  :

$$\begin{cases} \alpha \approx 4,8733 \cdot 10^{-11} m^2 \\ e \approx 0,003m \\ C_2 \approx 103680m^{-1} \end{cases}$$

## 4.2 .Résultats et Discussion

Quatre cas différents ont été étudiés en simulations 3D:

- Cas réel sans poreux {1} (géométrie de la figure. 2.a) ;
- Cas réel avec poreux {2} (géométrie de la figure. 2.a) ;
- Cas idéal avec poreux {3} (jambe de retour fermée ou cas idéal) ;
- Cas avec hélice et poreux {4} (l'hélice introduite dans la jambe de retour est utilisée comme étant la solution proposée pour stabiliser l'écoulement de l'air à l'intérieur de la colonne de fluidisation. Figure. 2.b).

La différence de pression entre la sortie et l'entrée  $\Delta P_{se}$ , le débit de masse par la colonne principale  $D_{cp}$ , et le débit de masse par la colonne secondaire  $D_{cs}$  ont été relevés et représentés sur le tableau 1, pour les quatre cas simulés. Quelques remarques peuvent être tirées de ce tableau :

- En comparant les résultats du cas {1} et du cas {2} on remarque que la prise en compte de la perte de charge créé par le poreux n'a pas changé les débits à travers les deux colonnes. Les valeurs de la différence de pression ( $\Delta P_{se}$ ) pour les trois derniers cas (avec poreux), sont égales.
- Un débit de masse important (1/4 du débit total) passe par la jambe de retour pour le cas {1} et le cas {2}. Ce débit a une influence direct sur l'écoulement dans la colonne de fluidisation, comme le montre la figure.3, où une dissymétrie apparaît sur les profils de vitesses tracés sur les droites horizontales montrées sur la figure.4.

Table 1 : Résultats de simulations des 4 cas étudiés.

	Cas {1}	Cas {2}	Cas {3}	Cas {4}
$\Delta P_{se}$ (pa)	12,37	541	541	542
$D_{cp}$ (kg/m2)	0,103	0,103	0,136	0,124
$D_{cs}$ (kg/m2)	<b>0.033</b>	<b>0.033</b>	<b>0</b>	<b>0.011</b>

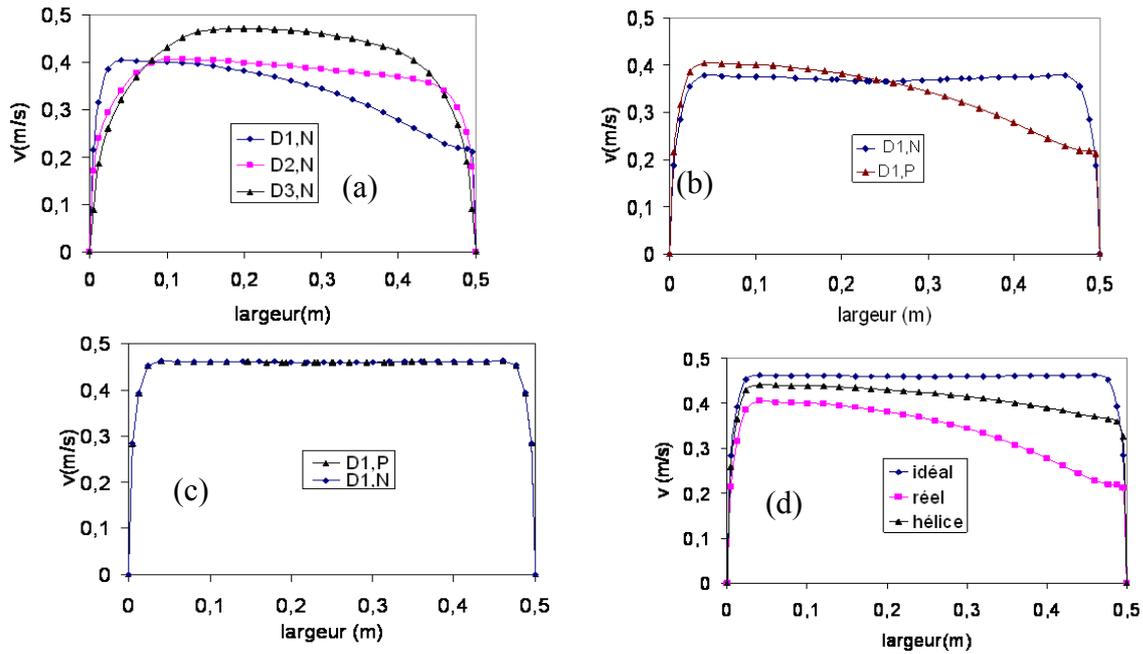


Figure 3. Profils de vitesses de l'air. **a)** sur les droites D1,N, D2,N et D3,N (cas {2}). **b)** sur les droites D1,P et D1,N (cas {2}). **c)** sur les droites D1,N et D1,P pour le cas idéal. **d)** sur la droite D1,N pour les 3 cas réel, idéal et avec hélice.

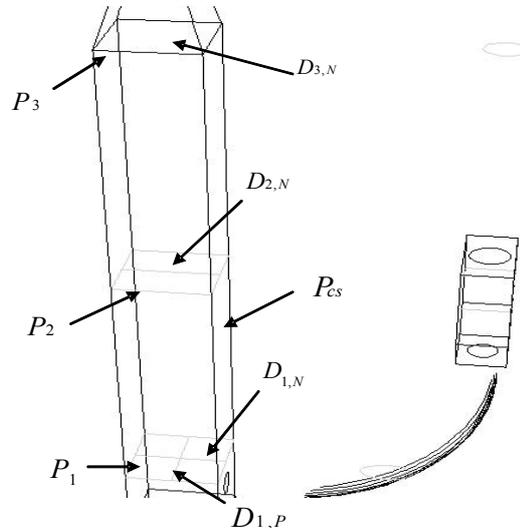


Figure 4. Positions des droites sur lesquelles les profils de vitesses sont tracés.

Pour remédier à ce problème nous avons proposé d'introduire une hélice dans la jambe de retour (cas {4}) permettant de créer des pertes de charges au fluide qui passe par cette dernière et de laisser s'écouler les particules solides pour rejoindre leurs positions de départ.

D'après les résultats de la tableau 1, l'introduction de l'hélice ne crée de pertes de charges que pour le fluide qui passe par la colonne secondaire ( $\Delta P_{se}$  reste constant), alors qu'elle a permis une réduction de 66 % du débit de masse par cette dernière, ce qui a une bonne influence sur l'écoulement dans la colonne comme le montre la figure 3.d. En effet le profil de vitesse résultant de la modification apportée à l'installation s'approche de celui du cas idéal. Et pour une même vitesse imposée à l'entrée, la valeur moyenne de la vitesse du fluide dans le cas {4} (avec hélice) est plus grande que celle du cas {2} (réel).

## 5. CONCLUSION

Une étude hydrodynamique de l'écoulement du gaz dans un dispositif à lit fluidisé circulant a été réalisée à l'aide du logiciel Fluent en tenant compte des pertes de charges créées par le poreux. Elle a permis de confirmer les remarques faites lors d'expériences antérieures concernant la non homogénéité de l'écoulement du gaz à l'intérieur de la colonne de fluidisation. Après la mise en évidence de la cause de cette non homogénéité, qui est l'existence non désirée d'un débit de masse dans la colonne secondaire, nous avons pu résoudre le problème en ajoutant un obstacle de forme hélicoïdale dans cette dernière. Celui-ci crée des pertes de charges pour le fluide tout en laissant s'écouler les particules solides. La simulation a montré une réduction de 66% du débit de masse entrant par la jambe de retour et une symétrisation du profil de vitesse dans la colonne principale. Il est intéressant de noter que cette étude numérique a entraîné la modification du dispositif expérimental avec l'installation d'une vanne rotative sur la jambe de retour.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. J.J. Nieuwland, R. Meijer, J.A.M. Kuipers, W.P.M. van Swaij, 1996, Measurements of solids concentration and axial solids velocity in gas-solid two-phase flows, *Powder Technology* 87 (1996) 127-139.
2. M. Das, A. Bandyopadhyay, B.C. Meikap, R.K. Saha, 2008, Axial voidage profiles and identification of flow regimes in the riser of a circulating fluidized bed, *Chemical Engineering Journal* (2008) p 10.
3. Y. Zhang, H. Arastoopour, 1995, Dilute fluidized cracking catalyst particles-gas flow behaviour the riser of a circulating fluidized bed, *Powder Technology* 84 (1995) 221-229.
4. C. H. Ibsen, T. Solberg, B. H. Hjertager, F. Johnsson, 2002, Laser Doppler anemometry measurements in a circulating fluidized bed of metal particles, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26 (2002) 851-859.
5. J. Zhou, J. R. Grace, C. J. Lim, C. M. H. Brerton, 1995, Particle velocity profiles in a circulating fluidized bed of square cross-section, *Chemical Engineering Science* 50 (1995) 237-244.
6. P.R. Tortora, S.L. Ceccio, A.G. Mychkovsky, T.J. O'Hern, J.R. Torczynski, 2008, Radial profiles of solids loading and flux in a gas-solid circulating fluidized bed, *Powder Technology* 180 (2008) 312-320.
7. B. Herb, S. Dou, K. Tuzla, J. C. Chen, 1992, Solid mass fluxes in circulating fluidized beds, *Powder Technology*, 70 (1992) 197-205.
8. T. Van den Moortel, Analyses locales des structures d'écoulements gaz-particules dans un lit fluidisé circulant, 1998, *thèse de l'université de Provence*.
9. J. C. Moran, L. R. Glicksman, 2002, Mean and fluctuating gas phase velocities inside a circulating fluidized bed, *Chemical Engineering Science* 58 (2003) 1867 - 1878.
10. Y. Tsuji, Y. Morikawa, H. Shiomi, 1984, LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe. *J. Fluid. Mech.* 139 (1984) 417-434.
11. O. Rahli, L. Tadrist, M. Miscovic et R. Santini, 1995, Etude expérimentale des d'écoulements darcéens à travers un lit de fibres rigides empilées aléatoirement : influence de la porosité, *J. Phys II France* 5 (1995) 1739-1756.