

Simulation numérique de l'écoulement turbulent dans une cuve bombée et chicanée agitée à l'aide d'un système à plusieurs étages de turbines à pales inclinées

Zied DRISS^{1*}, Mohamed SAMET¹, Fareh HAMRIT², Hedi KCHAOU¹, Brahim NECIB³, Mohamed Salah ABID¹

¹Laboratoire des Systèmes Electro-Mécaniques (LASEM), Département de Génie Mécanique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS), Université de Sfax, B.P. 1173, Route de Sokra, 3038 Sfax, Tunisie

²Département de Génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 28000 M'sila, Algérie

³Laboratoire de mécanique, Département de Génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie, Université Frères Mentouri - Constantine 1, Campus Chaab Ersas, 25000 Constantine, Algérie

* auteur correspondant : zied.driss@enis.tn

Résumé – L'étude de l'écoulement turbulent dans une cuve bombée et chicanée agitée à l'aide d'un système à plusieurs étages de turbines à pales inclinées est entamée par voie de simulation numérique. Les résultats présentés dans différents plans de la cuve sont issus de l'application du code commercial "Fluent" utilisant l'approche multi-références frame (MRF). Avec ce code, les équations de Naviers-Stokes régissant le phénomène de transfert sont résolues par une méthode de discrétisation aux volumes finis. Le modèle de turbulence utilisé est du type k-ε standard. La validité de la méthode d'analyse adoptée est assurée par comparaison de nos résultats numériques avec des résultats expérimentaux tirés de la littérature.

Mots Clés : Cuve bombée, chicanes, turbine, plusieurs étages, écoulement, turbulent.

Nomenclature

b	largeur des chicanes
d	diamètre de la turbine
e	hauteur de la pale
D	diamètre de la cuve
h	position de la turbine
H	Hauteur de la cuve
k	énergie cinétique turbulente
p	pression
r	position radiale
s	diamètre de l'axe de rotation
V	vitesse
w	largeur de la pale
z	position axiale

Symboles grecs

β	angle d'inclinaison
ε	taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
θ	position angulaire
μ	viscosité du fluide (Pa.s)

Indices et exposants

d	dynamique
t	turbulente
1	première turbine
2	deuxième turbine
6.	troisième turbine

1. Introduction

Les cuves agitées sont largement utilisées dans l'industrie alimentaire. Ils sont conçues afin d'effectuer plusieurs opérations comme les mélanges des fluides miscibles ou non miscibles, la dispersion des gaz, la suspension des solides et les réactions chimiques. L'opération d'agitation mise en œuvre par l'industrie vise essentiellement d'obtenir l'homogénéité du mélange et d'assurer

une distribution uniforme de la température et de particules. A ce propos, plusieurs travaux ont été développés. A titre indicatif, on peut citer les travaux réalisés par Suzukawa et al. [1], Dohi et al. [2], Szalai et al. [3], Dakshinamoorthy et al. [4], Kelly et al. [5], Zalc et al. [6], Alvarez et al. [7], Baccar et al. [8], Kuncewicz et al. [9], Distelho et al. [10], Kchaou et al. [11], Karcz et al. [12], Aubin et al. [13], Ammar et al. [14], Ben Amira et al. [15] et Driss et al. [16-17]. Une attention particulière a été consacrée à l'hydrodynamique des écoulements générés dans les cuves hautes équipées de plusieurs agitateurs. Ce type de système d'agitation présente des performances très intéressantes pour les opérations de dispersion de gaz et en particulier pour les fermentations puisqu'ils permettent l'augmentation du temps de résidence des bulles de gaz. Les systèmes multi-étagés sont également utilisés pour la mise en suspension de particules solides afin de limiter l'accumulation des particules au fond de la cuve. Parmi les différents types d'association de mobiles d'agitation, l'association de deux agitateurs radiaux est généralement recommandée dans les opérations de dispersion de gaz ou de liquide dans des fluides de faible viscosité. Par contre, ces systèmes ne sont plus adaptés pour les opérations contrôlées par le mélange, le transfert thermique et la mise en suspension des particules solides. Pour ces dernières applications nécessitant une bonne circulation de fluide, il est préférable d'associer un agitateur radial à un agitateur mixte ou deux agitateurs mixtes. Ce système est d'autant plus intéressant que la consommation de puissance est moindre comparé aux deux autres types d'association.

Dans ce cadre-là, nous nous sommes intéressés à simuler numériquement l'écoulement turbulent dans une cuve bombée et chicanée agitée à l'aide d'un système à plusieurs étages de turbines à pales inclinées. Il s'agit en fait de présenter les caractéristiques locales telles que la vitesse, la pression, ainsi que les caractéristiques de turbulence dans la cuve entière tout en modifiant le nombre des étages sur simulateur et d'étudier l'impact sur l'hydrodynamique de l'écoulement généré dans la cuve entière. La validité de la méthode d'analyse adoptée est assurée par comparaison de nos résultats numériques avec les résultats expérimentaux d'Aubin et al. [13].

2. Modèle numérique

Sur la figure 1 sont présentés les paramètres géométriques utilisés dans cette application. Il s'agit d'une cuve cylindrique bombée munie d'une turbine à six pales inclinées ayant un angle d'inclinaison $\beta=45^\circ$. Cet angle est mesuré entre le plan horizontal et le plan coïncidant avec la surface d'une pale. La cuve agitée est de diamètre $D=190$ mm et de hauteur $H=190$ mm. Elle est équipée sur toute sa longueur de quatre chicanes de largeur $b=19$ mm. La turbine de diamètre $d=95$ mm et de largeur $w=14$ mm est installée dans la cuve à l'aide d'un axe de rotation de diamètre $s=8$ mm. Dans le cas d'un système à plusieurs étages, on note par h_1 , h_2 et h_3 les positions axiales de la première, de la deuxième et de la troisième turbine par rapport au fond de la cuve. Selon l'application considérée, les valeurs de ces positions sont récapitulées dans le tableau 1. La position de la première turbine par rapport au fond de la cuve. Dans le cas Sa position par rapport au fond de la cuve est égale à $h=H/3$.

Dans ces conditions, on note par h_1 , h_2 , h_3 les positions axiales de la turbine par rapport au fond de la cuve. La première configuration à un seul étage est déjà étudiée expérimentalement par Aubin et al. [13]. C'est sur cette configuration que nous sommes basés pour la validation de nos résultats numériques avant de passer à l'étude des systèmes à deux et trois étages.

Les résultats présentés dans différents plans de la cuve sont issus de l'application du code commercial "Fluent" utilisant l'approche multi-références frame (MRF). Avec ce code, les équations de Naviers-Stokes régissant le phénomène de transfert sont résolues par une méthode de discrétisation aux volumes finis. Le modèle de turbulence utilisé est du type k- ϵ standard [14-17].

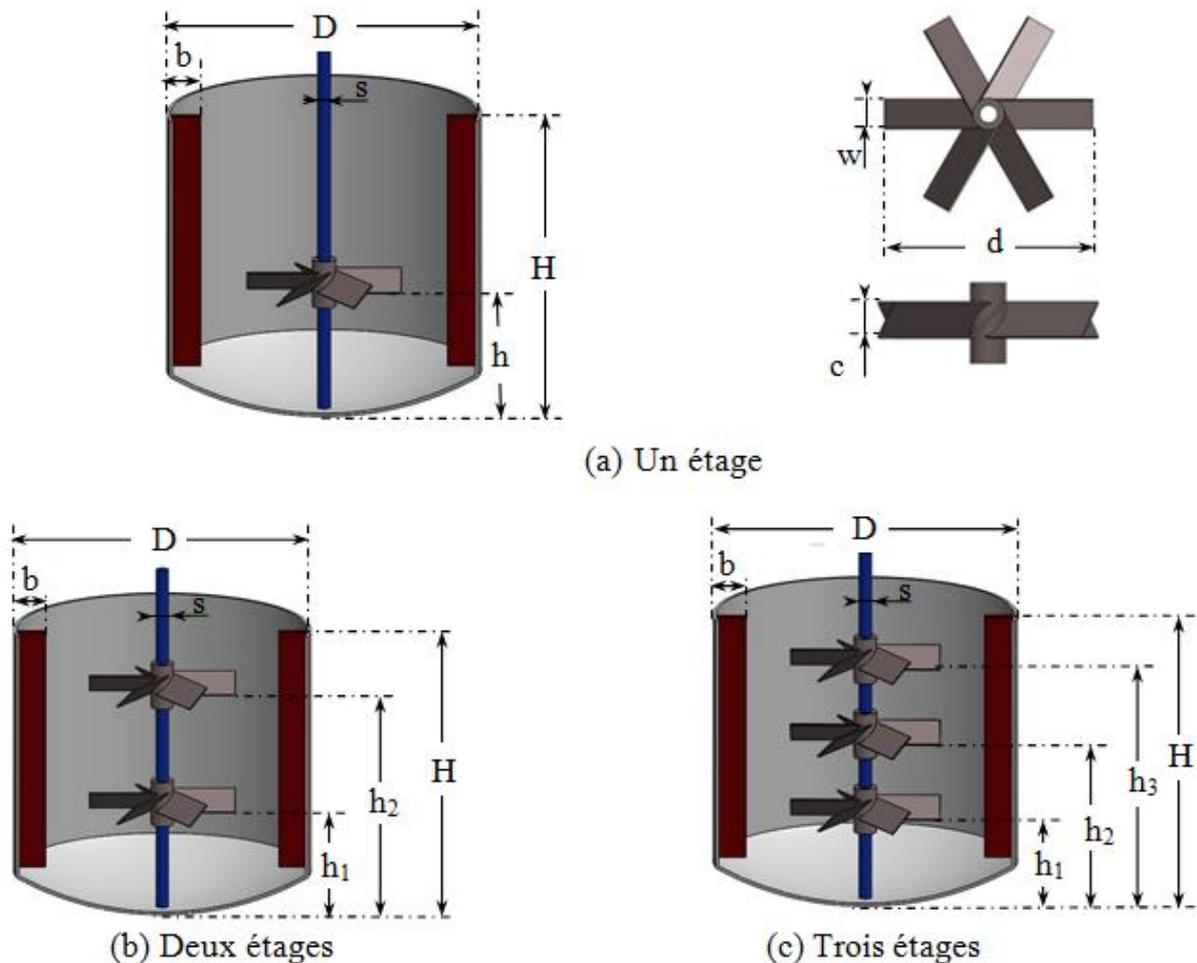


Figure 1 : Paramètres géométriques du système d'agitation.

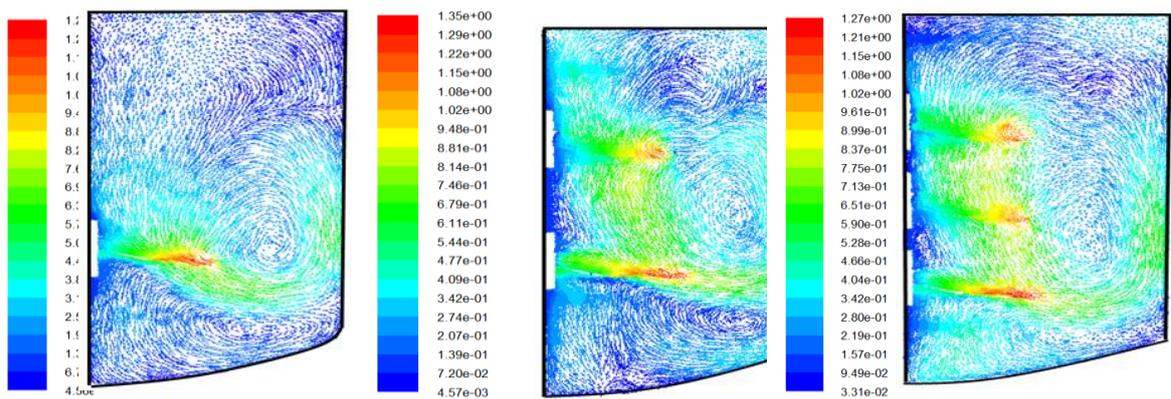
Tableau 1 :Position des turbines

Paramètres	Trois étages	Deux étages	Un étage
h_1	47.5 mm	63 mm	63 mm
h_2	95 mm	125.4 mm	-
h_3	142.5 mm	-	-

3. Résultats numériques

6.1. Champ des vitesses

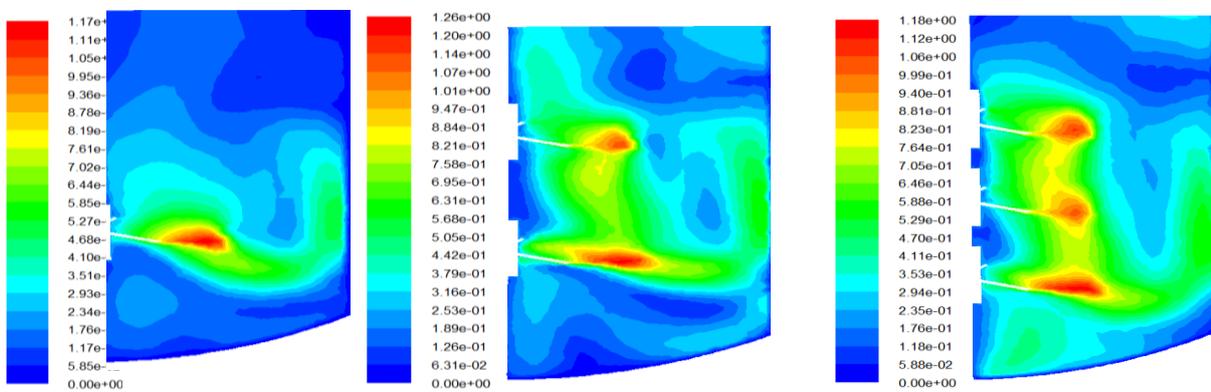
Sur la figure 2 est présenté le champ des vitesses pour les configurations à un seul, deux, et trois étages. D'après ces résultats, on note la création d'un jet radial dominant l'écoulement près des turbines inférieures. Sous l'effet des chicanes, ce jet se transforme en écoulement axial. On constate que dans les configurations à deux et à trois étages, les turbines supérieures créent un jet axial ; ce qui assure le pompage du fluide vers la turbine inférieure. Par ailleurs, ces résultats montrent la naissance de deux zones de recirculation du fluide de part et d'autre de la turbine pour les configurations ayant une et deux turbines. Par contre, on remarque que la configuration à trois étages de turbines est caractérisée par une seule zone de recirculation. On peut justifier cette différence dans la configuration à trois étages par le rapprochement de la turbine inférieure par rapport au fond de la cuve $z=0,25$, assurant ainsi la transformation du jet radiale en écoulement axial ascendant.



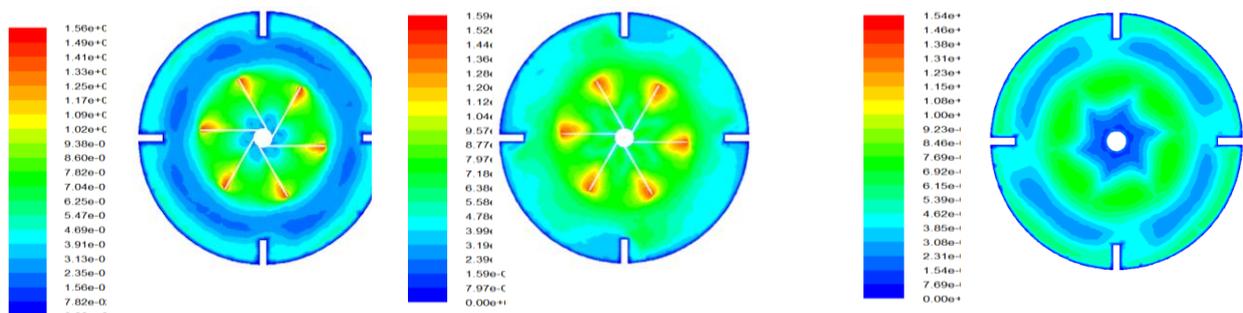
(a) Un étage (b) Deux étages (c) Trois étages
 Figure 2 : Champ de vitesse dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.

6.2. Vitesse moyenne

Sur les figures 3 et 4 est présentée la distribution de la vitesse moyenne dans les plans $r-z$ et $r-\theta$ définis respectivement par la position angulaire $\theta=45^\circ$ et par différentes positions axiales tout le long de la cuve. D'après ces résultats, on note l'existence des zones mortes pour la configuration à un seul étage, à partir de la position $z=0,52$. Egalement, on observe un ralentissement important de la vitesse du fluide. De même, la configuration à deux étages présente un ralentissement important au niveau de fond de la cuve. Ces zones mortes sont pratiquement éliminées dans la configuration à trois étages. Malgré que l'écoulement présente un ralentissement au voisinage des chicanes pour toutes les configurations, ces chicanes restent toujours indispensables afin d'éviter le phénomène de vortex.



(a) Un étage (b) Deux étages (c) Trois étages
 Figure 3 : Distribution de la vitesse moyenne dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.



(a) Un étage ($z=0,35$) (b) Deux étages ($z=0,35$) (c) Trois étages ($z=0,35$)

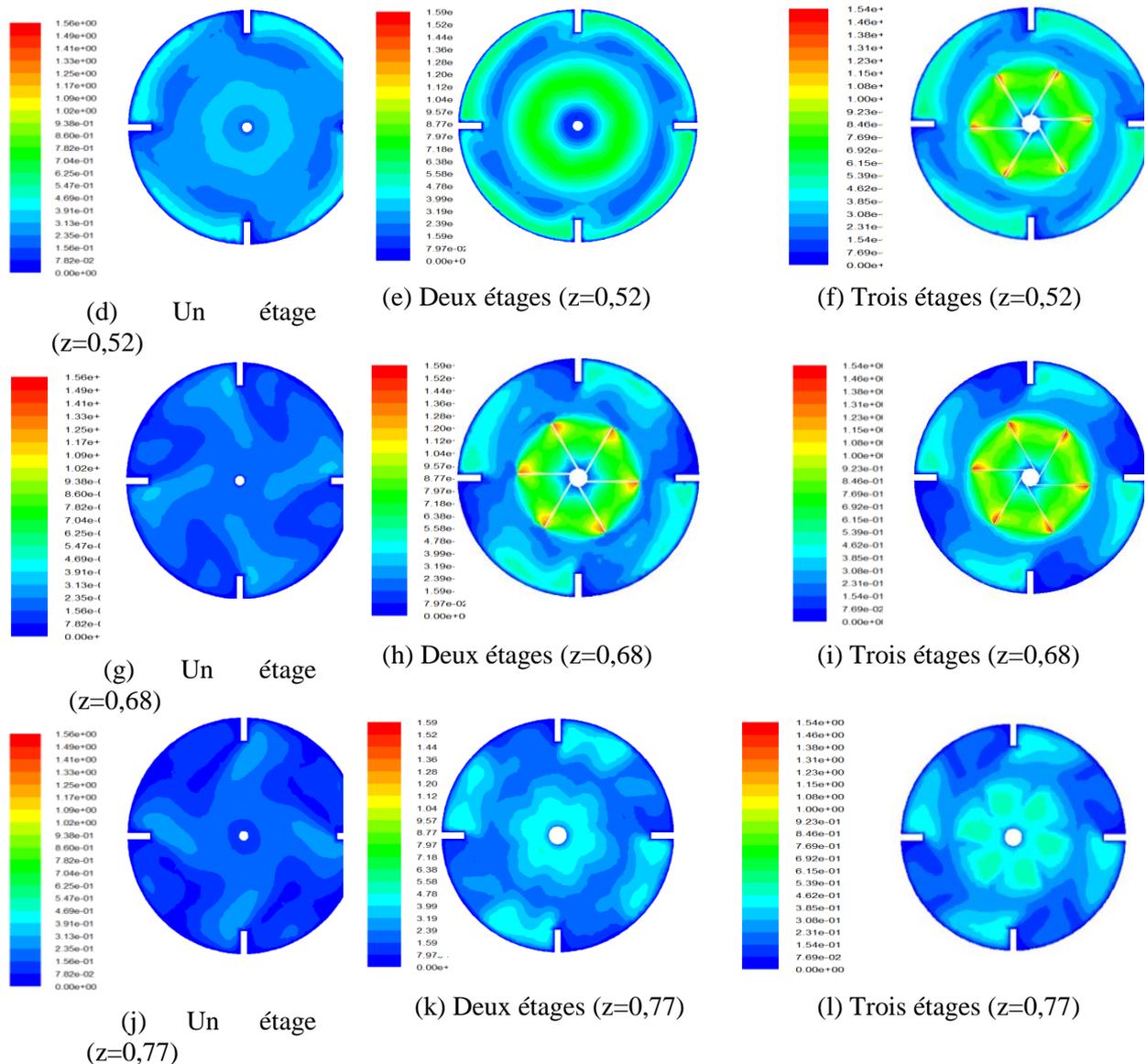


Figure 4 : Distribution de la vitesse moyenne dans des différents plans $r-\theta$.

6.3. Pression statique

Sur les figures 5 et 6 est présentée la distribution de la pression statique dans la cuve agitée muni d'une ou plusieurs turbines dans les plans $r-z$ et $r-\theta$ définis respectivement par $\theta=45^\circ$ et $z=0,68$. D'après ces résultats, on observe la formation d'une zone de dépression qui apparaît au voisinage des turbines supérieures pour les configurations à deux et à trois étages. Cette zone de dépression est définie par des valeurs de pression statique négatives qui caractérisent la dépression créée par les turbines. Au-dessous de la turbine située dans le premier étage, on remarque la création d'une zone de compression caractérisée par des valeurs de pression positives. Cette zone de compression est située dans la partie inférieure de la cuve du côté des parois cylindriques pour toutes les configurations étudiées.

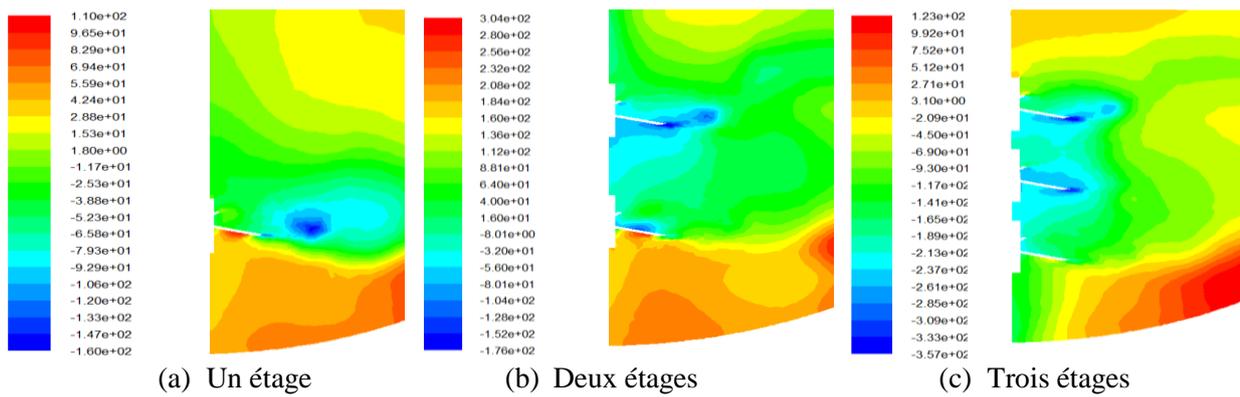


Figure 5 : Distribution de la pression statique relative dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.

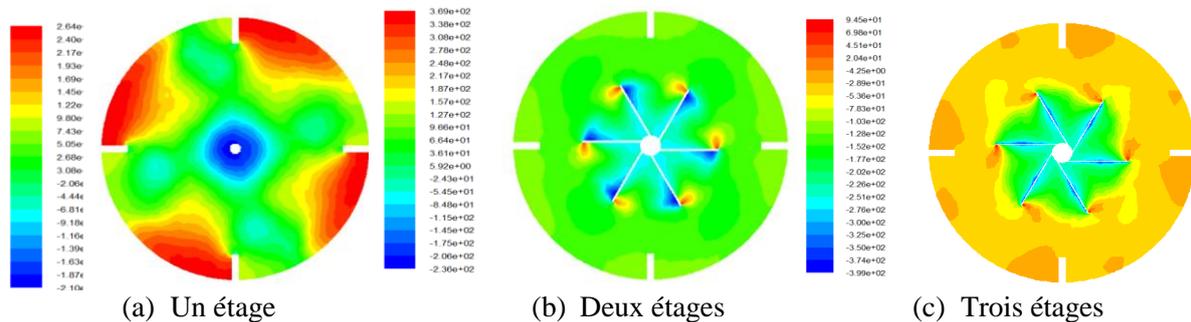


Figure 6 : Distribution de la pression statique relative dans le plan $r-\theta$ défini par $z=0,68$.

6.4. Pression dynamique

Sur les figures 7 et 8 est présentée la distribution de la pression dynamique dans la cuve agitée muni d'une ou plusieurs turbines dans les plans $r-z$ et $r-\theta$ définis respectivement par $\theta=45^\circ$ et $z=0,68$. D'après ces résultats, on observe la formation d'une zone de compression au bout des pales pour les différentes turbines. Les valeurs de la pression dynamique diminuent rapidement loin de ce domaine et au voisinage des parois des trois cuves étudiées. Par ailleurs, on remarque que la région inférieure de la cuve ayant trois turbines admet une pression dynamique importante. Par contre elle est très faible pour les deux autres configurations. Les valeurs maximales des pressions dynamiques sont localisées au bout de la turbine inférieure pour toutes les configurations considérées. Dans ces conditions, la pression dynamique atteint les valeurs égales à $p_d=609$ Pa, $p_d=850$ Pa, $p_d=1020$ Pa respectivement pour les configurations à une, deux et trois étages.

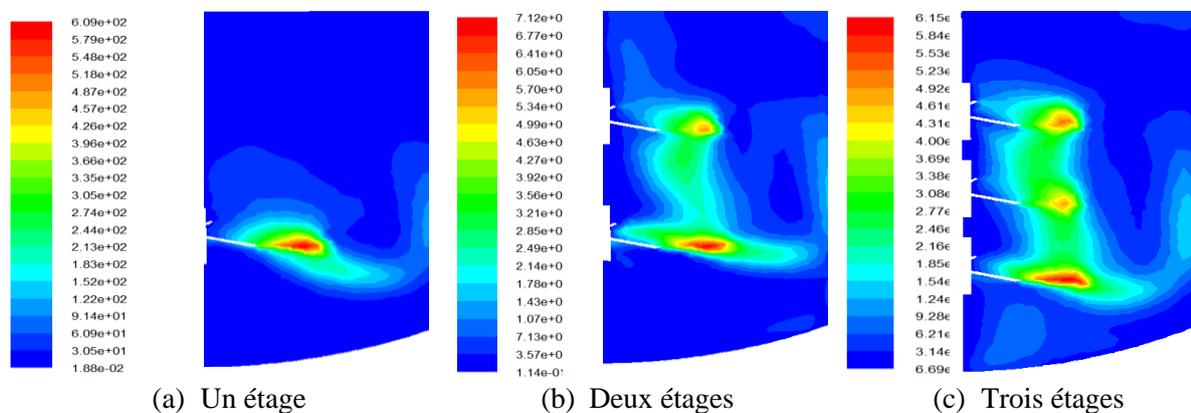


Figure 7 : Distribution de la pression dynamique dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.

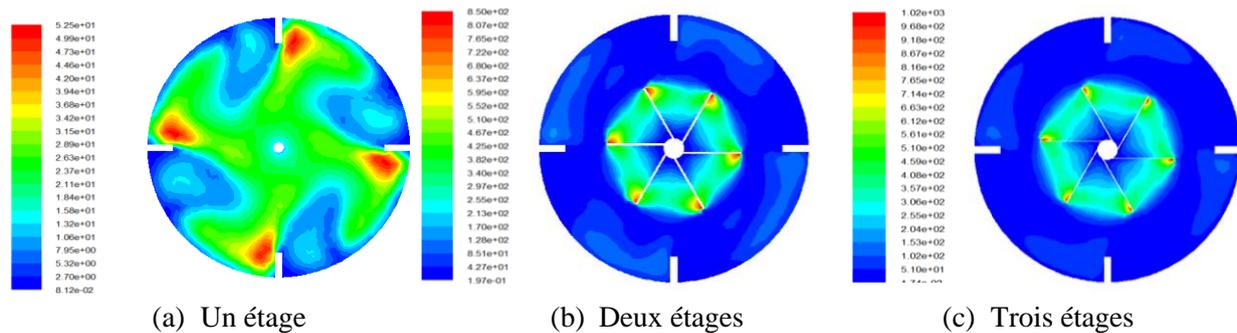


Figure 8 : Distribution de la pression dynamique dans le plan $r-\theta$ défini par $z=0,68$.

6.5. Energie cinétique turbulente

Sur les figures 9 et 10 est présentée la distribution de l'énergie cinétique turbulente dans la cuve agitée munie d'une ou plusieurs turbines dans les plans $r-z$ et $r-\theta$ définis respectivement par $\theta=45^\circ$ et $z=0,68$. D'après ces résultats, on constate que l'énergie cinétique turbulente demeure assez élevée aux voisinages des turbines pour toutes les configurations. Loin de ce domaine, elle devient très faible. Par ailleurs, on note que l'énergie cinétique turbulente au niveau du fond de la cuve pour les géométries ayant une et deux turbines est très faible. De plus, on remarque que l'étendue de la zone de sillage siège des valeurs maximales de l'énergie cinétique turbulente est beaucoup plus important dans le cas de la configuration à trois étages.

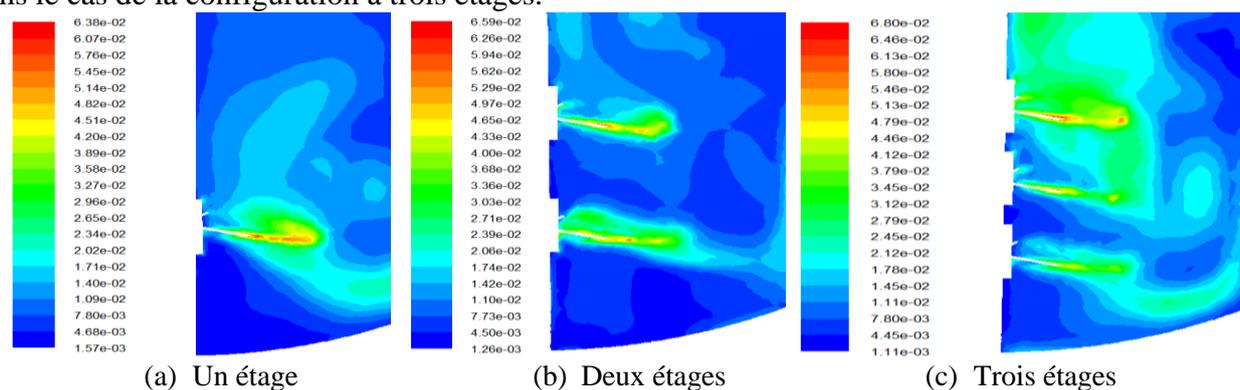


Figure 9 : Distribution de l'énergie cinétique turbulente dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.

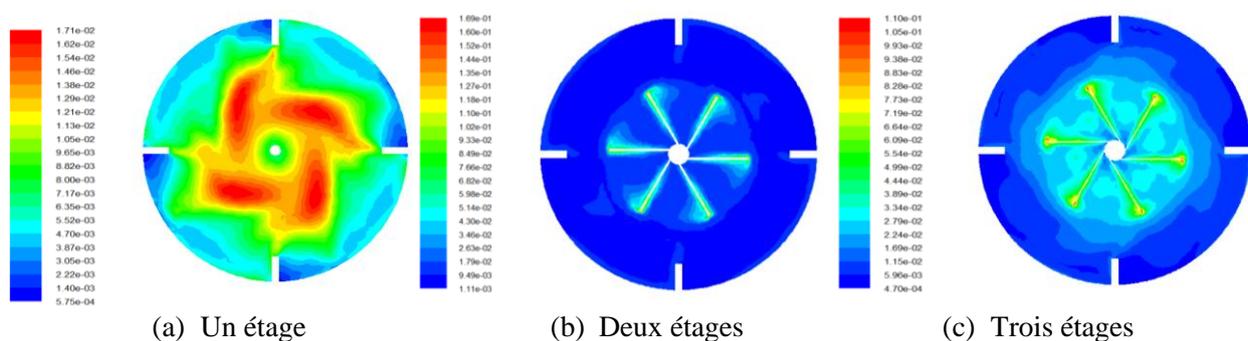


Figure 10 : Distribution de l'énergie cinétique turbulente dans le plan $r-\theta$ défini par $z=0,68$.

6.6. Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

Sur les figures 11 et 12 est présentée la distribution du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente dans la cuve agitée munie d'une ou plusieurs turbines dans les plans $r-z$ et $r-\theta$ définis

respectivement par $\theta=45^\circ$ et $z=0,68$. D'après ces résultats, on observe une distribution similaire pour les différentes configurations. La région siège des valeurs maximales se localise au voisinage des turbines. Hors de ce domaine, le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente reste invariant et très faible.

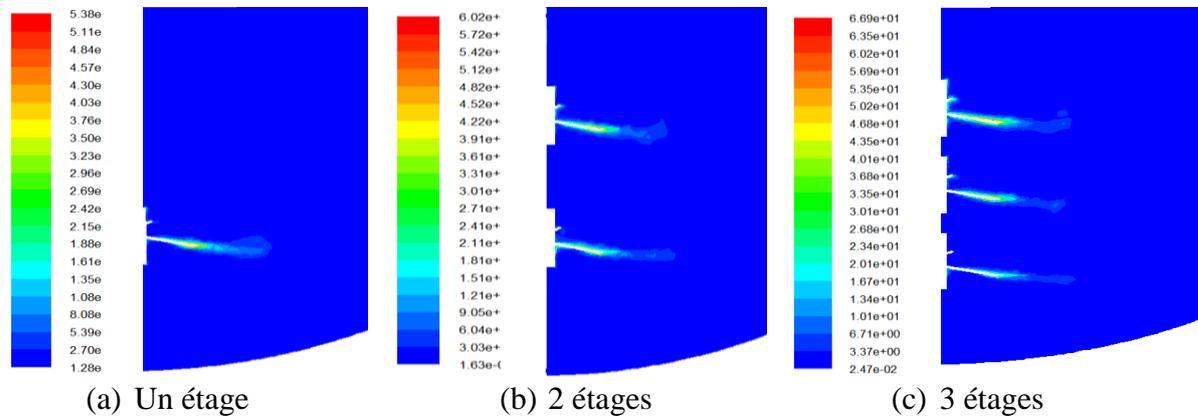


Figure 11 : Distribution du taux de dissipation turbulent dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.

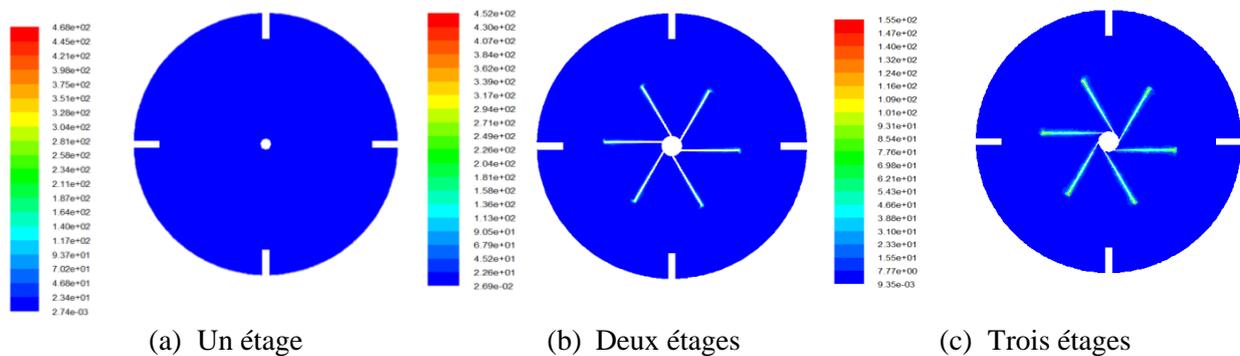


Figure 12 : Distribution du taux de dissipation turbulent dans le plan $r-\theta$ défini par $z=0,68$.

6.7. Viscosité turbulente

Sur les figures 13 et 14 est présentée la distribution de la viscosité turbulente dans la cuve agitée munie d'une ou plusieurs turbines dans les plans $r-z$ et $r-\theta$ définis respectivement par $\theta=45^\circ$ et $z=0,68$. D'après ces résultats, on note que la zone de sillage siège des valeurs maximales de la viscosité turbulente est située au-dessus de la turbine et s'étend jusqu'à la surface libre de la cuve. L'étendue de cette zone de sillage est très développée avec un seul étage. Par contre, cet étendu diminue avec la diminution de la distance entre la turbine et la surface libre de la cuve. Loin des turbines, elle devient très faible et tend vers zéro. Pour les configurations à deux étages et à trois étages, on remarque que la viscosité turbulente atteint respectivement les valeurs maximales égales à $\mu_t=0,13\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ et $\mu_t=0,49\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

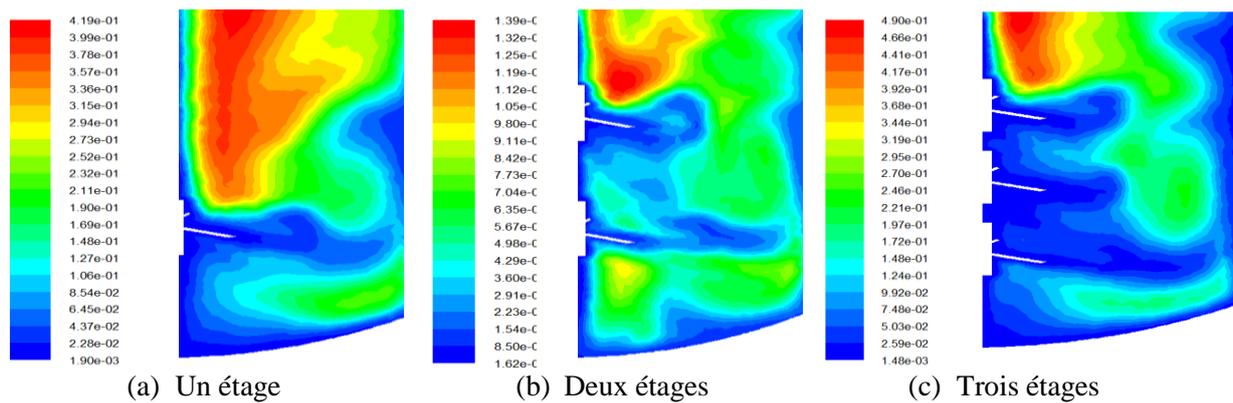


Figure 13 Distribution de la viscosité turbulente dans le plan $r-z$ défini par $\theta=45^\circ$.

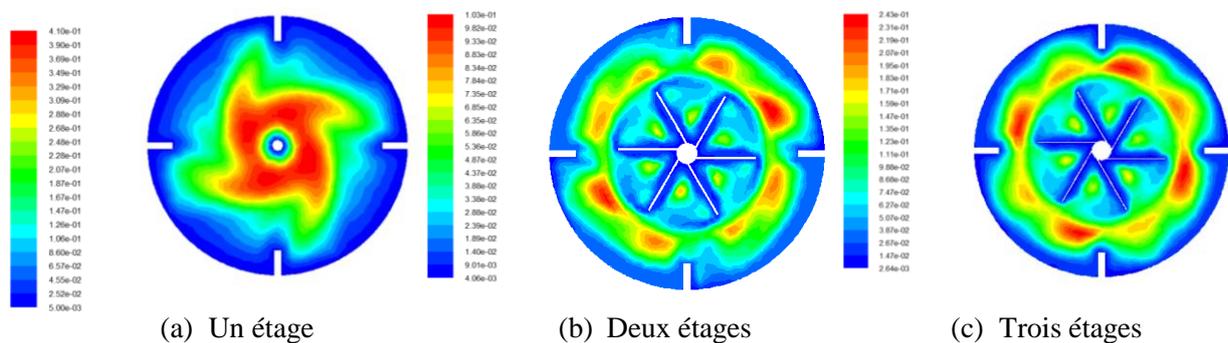


Figure 14 : Distribution de la viscosité turbulente dans le plan $r-\theta$ défini par $z=0,68$.

4. Conclusion

Par voie de simulation numérique, nous sommes intéressés à l'étude de l'écoulement turbulent dans une cuve bombée et chicanée agitée à l'aide d'un système à plusieurs étages de turbines à pales inclinées. Il s'agit en fait de présenter les caractéristiques locales dans la cuve entière tout en modifiant le nombre des étages. D'après cette étude, on montre l'intérêt d'utiliser un système à plusieurs étages afin de minimiser les zones mortes et d'assurer un meilleur mélange dans la cuve agitée. Ces résultats trouveront leurs intérêts dans les applications industrielles s'intéressant essentiellement aux préparations des huiles végétales.

Références

44. K. Suzukawa, S. Mochizuki, H. Osaka, Effect of the attack angle on the roll and trailing vortex structures in an agitated vessel with a paddle impeller. *Chemical Engineering Science*. 61 (2006) 2791-2798.
45. Dohi N., T. Takahashi, K. Minekawa, Y. Kawase, Power consumption and solid suspension performance of large-scale impellers in gas-liquid-solid three-phase stirred tank reactors. *Chemical Engineering Journal*. 97 (2004) 103-114.
46. Szalai E.S., P. Arratia, K. Johnson, F.J. Muzzio, Mixing analysis in a tank stirred with Ekato/Intermig impellers. *Chemical Engineering Science*. 59 (2004) 3793-3805.
47. D. Dakshinamoorthy, A.R. Khopkar, J.F. Louvar, V.V. Ranade, CFD simulations to study short stopping runaway reactions in a stirred vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 17 (2004) 355-364.
48. W. Kelly, B. Gigas, Using CFD to predict the behavior of power law fluids near axial-flow impellers operating in the transitional flow regime. *Chemical Engineering Science*. 58 (2003) 2141-2152.

49. J.M. Zalc, E.S. Szalai, M.M. Alvarez, F.J. Muzzio, Using CFD To Understand Chaotic Mixing in Laminar Stirred Tanks. *AIChE Journal*. 48 (2002) 2124-2134.
50. M.M. Alvarez, J.M. Zalc, T. Shinbrot, P.E. Arratia, F.J. Muzzio, Mechanisms of Mixing and Creation of Structure in Laminar Stirred Tanks. *AIChE Journal*. 48 (2002) 2135-2148.
51. M. Baccar, M. Mseddi, M.S. Abid, Contribution numérique à l'étude hydrodynamique et thermique des écoulements turbulents induits par une turbine radiale en cuve agitée. *International Journal of Thermal Sciences*. 40 (2001) 753-772.
52. C. Kuncewicz, M. Pietrzykowski, Hydrodynamic model of a mixing vessel with pitched-blade turbines. *Chemical Engineering Science*. 56 (2001) 4659-4672.
53. M.F.W. Distelho, A.J. Marquis, Scalar mixing in the vicinity of two disk turbines and two pitched blade impellers. *Chemical Engineering Science*. 55 (2000) 1905-1920.
54. H. Kchaou, Z. Driss, G. Bouzgarrou, W. Chtourou, M.S. Abid, Numerical Investigation of Internal Turbulent Flow Generated By A Flat-Blade Turbine and A Pitched-Blade Turbine in A Vessel Tank. *International Review of Mechanical Engineering*. 2 (2008) 427-434.
55. J. Karcz, M. Major, An Effect of a baffle Length on the power consumption in an agitated vessel. *Chemical Engineering and Processing*. 37 (1998) 249-256.
56. J. Aubin, N. Le Sauze, J. Bertrand, D.F. Fletcher, C. Xuereb, PIV measurements of flow in an aerated tank stirred by a down- and an up-pumping axial flow impeller. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 28 (2004) 447-456.
57. M. Ammar, W. Chtourou, Z. Driss, M.S. Abid, Numerical investigation of turbulent flow generated in baffled stirred vessels equipped with three different turbines in one and two-stage system. *Energy*. 36 (2011) 5081-5093.
58. B. Ben Amira, Z. Driss, M.S. Abid, Experimental study of the up-pitching blade effect with a PIV application. *Ocean Engineering*. 102 (2015) 95-104.
59. Z. Driss, G. Bouzgarrou, W. Chtourou, H. Kchaou, M.S. Abid, Computational studies of the pitched blade turbines design effect on the stirred tank flow characteristics. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 29 (2010) 236-245.
60. Z. Driss, S. Karray, W. Chtourou, H. Kchaou, M. S. Abid, A Study of Mixing Structure in Stirred Tanks Equipped with Multiple Four-Blade Rushton Impellers. *Archive of Mechanical Engineering*. 59 (2012) 53-72.