

ETUDE HYDRODYNAMIQUE COMPARATIVE ENTRE DES QUADRIPALES CHANFREINEES ET DROITES

Benyamina LEILA¹

The present work is a numerically comparative simulation in 3D in laminar regime of the flow generated by two agitators with four blades (chamfered and straight) in tanks with flat bottoms.

The mobiles have the same diameter (d), the same surface, but they do not have the same geometry, to do it the height of the chamfered blade is modified with different angles ($\pi/6$, $\pi/8$, $\pi/10$, $\pi/15$), taking the same surface of the impellers implies the same volume of fluid swept by the blades, for the comparison to be justified.

Comparing with straight blades, an analysis of the effect of the degree of chamfering of the blades namely ($\pi / 6$, $\pi / 8$, $\pi / 15$) was carried out on the contours of the axial speed in the YZ plane, of the tangential speed on the YZ and XY planes, as well as on the contours of isovalues and current lines, also a study of the influence of chamfering on the axial and tangential speed profiles, by varying the number of Re (05,10, 20,40)..

Finally, the energy consumption of different types of mobile was compared. It has been shown that the degree of chamfering $\pi / 6$ consumes the least energy and gives a better quality of the final product in terms of homogenization because it shears the stagnant zones (vortex) at the level of the tank.

Le présent travail est une simulation numérique en 3D, en régime laminaire de l'écoulement généré par deux agitateurs à quatre pales (chanfreinées et droites) dans des cuves à fond plat.

Les mobiles ont le même diamètre, la même surface, mais ils n'ont pas la même géométrie, pour ce faire la hauteur de la lame chanfreinée est modifiée avec de différents angles ($\pi/6$, $\pi/8$, $\pi/10$, $\pi/15$), prendre la même surface de mobile implique le même volume de fluide balayé par les pales, pour que la comparaison soit justifiée.

En comparant avec des lames droites, une analyse de l'effet du degré de chanfreinage des lames à savoir ($\pi/6$, $\pi/8$, $\pi/15$) a été réalisée sur les contours de la vitesse axiale dans le plan YZ, de la vitesse tangentielle sur les plans YZ et XY, ainsi que sur les contours des isovaleurs et des lignes de courant, également une étude de l'influence du chanfreinage sur les profils des vitesses axiale, tangentielle, en faisant varier le nombre de Re (5,10, 20,40).

Enfin, la consommation d'énergie de différents types de mobiles a été comparée, il a été démontré que le degré de chanfreinage $\pi/6$ consomme le moins d'énergie et donne une meilleure qualité du produit final en termes d'homogénéisation car il cisaille les zones stagnantes (vortex) au niveau de la cuve.

Mots clefs : Géométrie de mobile, quadripale, hydrodynamique en 3D, mobile chanfreiné, même surface de fluide balayée.

1. Introduction

¹ Enseignante au niveau du Département de Génie-Mécanique , Membre du laboratoire ENERGARID de l'université Tahri Mohamed de Béchar Algérie , e-mail: Lben05@yahoo.fr

Des progrès significatifs ont été réalisés en faveur de l'agitation mécanique, grâce à des techniques utilisant des méthodes très avancées, tant numériques qu'expérimentales.

Les caractéristiques de mélange dans une cuve cylindrique équipée d'une turbine Rushton et d'une turbine à hélice ont été étudiées expérimentalement et numériquement par Pan Zhang et al [1], des comparaisons de consommation d'énergie et de temps de mélange ont montré que le rotor d'hélice est relativement plus économique en énergie.

Une recherche expérimentale et numérique des écoulements laminaires dans une cuve agitée par une Pitch Blade Turbine (PBT) a été menée par Cui YY et al [2], en faisant varier la distribution du débit et de la concentration à différentes positions en fonction du temps de mélange à l'aide de deux méthodes numériques, afin de réduire les régions stagnantes et d'augmenter la qualité de mélange et l'efficacité de la roue PBT, cette roue s'est avérée plus appropriée pour les industries agricoles.

Des études numériques [3,5] analysant l'écoulement dans les cuves, ont une conclusion commune démontrant que les agitateurs à basse vitesse génèrent un écoulement tangentiel, même conclusion pour l'étude expérimentale [6].

Numériquement, les premiers modèles simulant l'écoulement autour d'un agitateur à pales [7,8] étaient basés sur une discrétisation par la méthode des différences finies centrées, qui n'est valable que pour les faibles nombres de Reynolds. Cependant, pour les écoulements turbulents, les travaux [9,10] se sont basés sur une discrétisation des équations différentielles de continuité et des variables de mouvement primitives (u, v, w).

C. Kunczewicz [11], cette étude est une simulation numérique tridimensionnelle de l'écoulement d'un fluide incompressible autour d'un agitateur (turbine plate) en régime laminaire, les débits primaire et secondaire ont été calculés ainsi que les magnitudes des trois composantes de vitesse: tangentielle, radiale et axiale, c'est-à-dire qu'une solution tridimensionnelle de l'équation de Navier-Stokes a été obtenue numériquement.

D'autres recherches ont abordé d'autres géométries de mobiles, à savoir l'étude expérimentale de l'écoulement turbulent induit par un agitateur à six pales inclinées à 60° dans une cuve à chicanes réalisée par RM Hockey et al [12], une comparaison avec une roue Rushton de la même taille a montré que l'efficacité de pompage de la roue inclinée est environ 2.5 fois plus élevée et dissipe moins de puissance.

Une étude expérimentale [13] du champ de vitesse et de la consommation d'énergie avec un agitateur à deux pales, pour un fluide viscoélastique et des fluides inélastiques newtoniens et non newtoniens à titre de comparaison, il a été remarqué une influence significative de l'élasticité pour un nombre de Reynolds supérieur à une valeur seuil 5.7, au-dessus de cette valeur, le nombre de puissance

augmente et le champ de vitesse est profondément modifié. Ce comportement est principalement lié à l'élasticité du fluide.

2. Présentation géométrique du système

La présente étude, est une contribution à l'étude hydrodynamique en 3D induite par des mobiles à quatre pales en régime laminaire de deux cuves cylindriques à fond plat de diamètre D .

La première cuve est agitée par une quadripale à pales chanfreinées, et la deuxième par une quadripale à pales droites, les deux mobiles ont le même diamètre d et gardent la même surface dont le but de balayer le même volume du fluide. Les géométries et les dimensions sont illustrées comme suit :

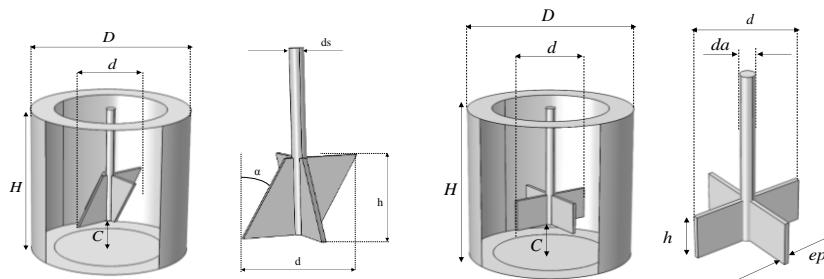


Fig.1. Modèle géométrique

Les dimensions du modèle géométrique

Table 1

D (m)	d (m)	H (m)	C (m)	h (m)	da (m)	ep (m)	α (°) Degré du chanfrein
0.49	0.245	0.49	0.1	0.1	0.03	0.009	$\pi/6, \pi/8, \pi/10, \pi/15$ et $\pi/20$

3. Formulation mathématique du système

3.1 L'expression mathématique du chanfreinage de la lame est la suivante :

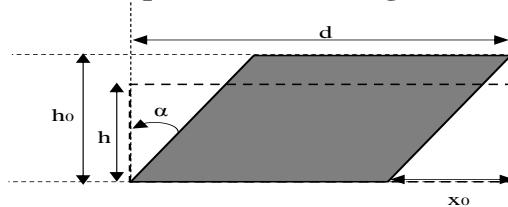


Fig.2. Chanfreinage de la pale

h : hauteur de la pale dans le cas droit ($\alpha \rightarrow 0$), d : le diamètre de l'agitateur

h_0 : hauteur de la pale dans le de chanfrein ($\alpha > 0$), x_0 : déviation due au chanfrein
 α : l'angle de chanfrein, la variation du paramètre α est prise de telle façon qu'on ait le même volume balayé c'est-à-dire (le volume du parallélépipède) :

On note S_1 l'aire de la pale droite ($\alpha \rightarrow 0$) et S_2 l'aire de la pale chanfreinée

$$S_1 = h \times d$$

$$S_2 = h_0 \times (d - x_0) , \text{ Alors on calcule } h_0: S_1 = S_2 \Leftrightarrow h_0 \times (d - x_0) = h \times d$$

$$S_1 = S_2 \Leftrightarrow h_0 \times (d - h_0 \tan \alpha) = h \times d ,$$

$$S_1 = S_2 \Leftrightarrow (-\tan \alpha)h_0^2 + dh_0 - hd = 0$$

Pour résoudre cette dernière équation, on introduit le discriminant Δ :

$$\Delta = d^2 - 4(-\tan \alpha)(-hd) = d^2 - 4hd \tan \alpha$$

Pour que l'équation soit résoluble, il est indispensable que le discriminant soit

$$\text{positif : } d^2 - 4hd \tan \alpha \geq 0 \Rightarrow \tan \alpha \leq \frac{d}{4h} \Rightarrow 0 \leq \alpha \leq \arctan\left(\frac{d}{4h}\right) \quad (1)$$

$$h_0 = \frac{-d \pm \sqrt{d^2 - 4hd \tan \alpha}}{-2 \tan \alpha} = \frac{d\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4h \tan \alpha}{d}}\right)}{2 \tan \alpha} , \text{ on deux solution distinctes:}$$

$$h_0 = \frac{d}{2 \tan \alpha} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4h \tan \alpha}{d}}\right) , \quad h_0 = \frac{d}{2 \tan \alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4h \tan \alpha}{d}}\right)$$

$$\text{Il faut choisir } h_0 \text{ pour que } x_0 < d/2, \text{ avec : } h_0 \leq \frac{d}{2 \tan \alpha}$$

Avec les dimensions de d et h comme dans le tableau 1, $d = 0.245\text{m}$ et $h = 0.1\text{m}$

Le domaine de validité de calcul par rapport à l'angle de chanfrein est (d'après (1)) :

$$0 \leq \alpha \leq \arctan\left(\frac{0.245}{4 \times 0.1}\right) = 0.54956 \equiv a_c$$

(C'est la valeur critique au-dessous de laquelle le chanfrein soit possible)

$$\alpha \equiv \frac{\pi}{10000000}, \frac{\pi}{20}, \frac{\pi}{15}, \frac{\pi}{10}, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{6}$$

$$\text{Si on remarque que } \frac{\pi}{6} = 0.5236 \text{ et } \frac{\pi}{5} = 0.6283$$

La valeur de $\pi/5$ dépasse la valeur critique donc on peut arrêter la simulation pour l'angle $\pi/6$.

Le système est simulé avec un CFD Comsol qui est basé sur la méthode des éléments finis, pour le choix de la physique nous avons utilisé la méthode du domaine tournant, où nous avons injecté une vitesse de rotation, puis l'étude du frozen rotor a été adoptée, enfin pour généraliser le problème la forme adimensionnelle des grandeurs a été choisie.

Le maillage utilisé est celui tétraédrique irrégulier, où il a été raffiné près des parties mobiles (agitateur), et le nombre d'éléments de domaine est de 1265146.

4. Validation du modèle numérique proposé à simuler

Pour vérifier la fiabilité de nos simulations et la conformité de nos résultats nous les avons comparé avec des travaux antérieurs d'un agitateur bipale à pales droites ($d/D=0.5$) [4,6].

On a validé notre travail suivant les deux paramètres local et global avec des travaux expérimentaux sur un agitateur bipale droit ($d/D=0.5$):

- Suivant le paramètre local qui est la vitesse tangentielle (V_{θ^*}) sur la pale et son prolongement ainsi que sur la médiatrice, qu'on a validé avec l'étude expérimentale de [6], conformément à la figure(3) une bonne concordance est démontrée.
- Suivant le paramètre global qui est le nombre de puissance N_p , qu'on a validé avec l'étude expérimentale de [4], comme le montre la figure (4), une bonne concordance est clairement confirmée. (en rouge :le présent travail, en vert: les travaux [4,6]).

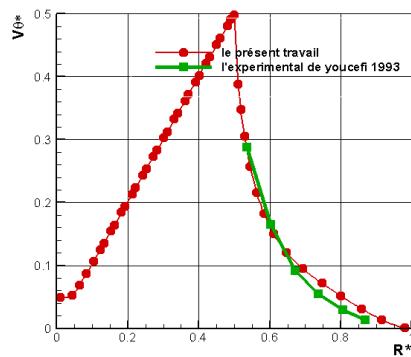


Fig.3. Vitesse tangentielle par rapport à la pale et son prolongement

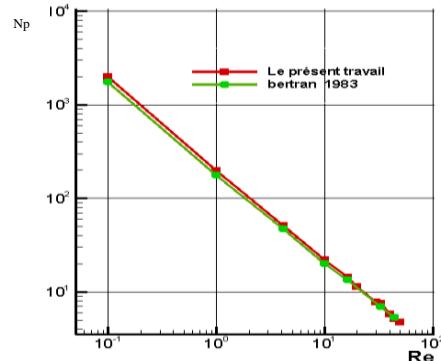


Fig.4. Nombre de puissance en fonction du Re

5 . Résultats de la simulation numérique

Nous avons mené une étude comparative entre la quadriplate chanfreinée et la droite pour le diamètre $d/D=0.5$, ensuite traité l'hydrodynamique de notre système en procédant au chanfreinage des pales($\pi/6, \pi/8, \pi/10, \pi/15$ et $\pi/20$) , tout en comparant les résultats des variations des valeurs des vitesses axiales, tangentielles et radiales, des fonctions de courant, du champs de vitesse, des isovaleurs et du nombre de puissance $N_p=f(Re)$,en faisant varier le nombre de Re (5, 20, 40).

5.1. Consommation énergétique

Pour voir l'évolution du nombre de puissance en fonction du Re , on a choisi six degrés de chanfreinage, $\alpha=(\pi/6, \pi/8, \pi/10,\pi/15$ et $\pi/20$) et bien sûr en les comparant aux pales droites($\alpha=0$), tout en procédant à la variation du

nombre de Re (5, 20, 40), autrement dit voir l'influence du degré de chanfreinage sur la consommation énergétique.

Les résultats sur la variation du nombre de puissance (la consommation d'énergie) en fonction de l'inertie sont conformément aux graphiques ci-dessous :

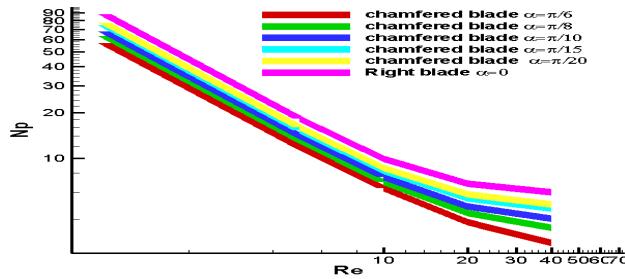


Fig.5. Np en fonction de Re

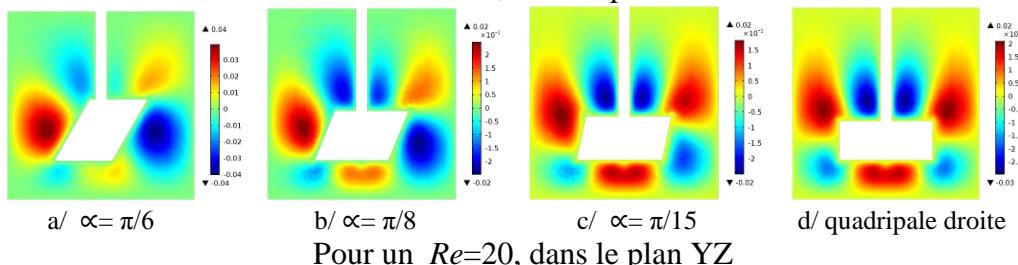
D'après la figure (5), la quadripale chanfreinée consomme le moins d'énergie, contrairement à celle droite qui consomme le plus.

5.2 Influence de l'inertie sur l'évolution des vitesses Axiales et tangentialles

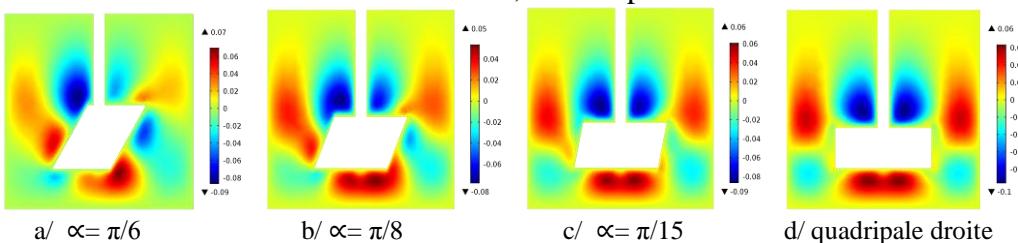
On a procédé à l'étude de quatre configurations de mobile, les chanfreinées ($\pi/6, \pi/8, \pi/15$) et la quadripale droite, en faisant varier le nombre de Re (5, 20, 40), puis on a analysé l'impact de la variation du Nombre de Reynolds sur les contours et les profils des vitesses (axiale et tangentielle) sur les plans YZ et XY.

Variation de la vitesse axiale

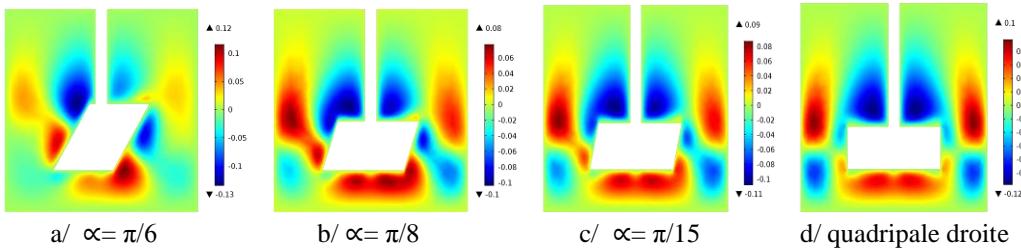
Pour un $Re=5$, dans le plan YZ :



Pour un $Re=20$, dans le plan YZ



Pour un $Re=40$, dans le plan YZ

Fig.6. Contours de la vitesse axiale des agitateurs $\pi/6, \pi/8, \pi/15$ et droit

On remarque que la vitesse axiale augmente avec l'augmentation du chanfreinage et du Re , ce qui implique que le chanfreinage favorise l'écoulement axial.

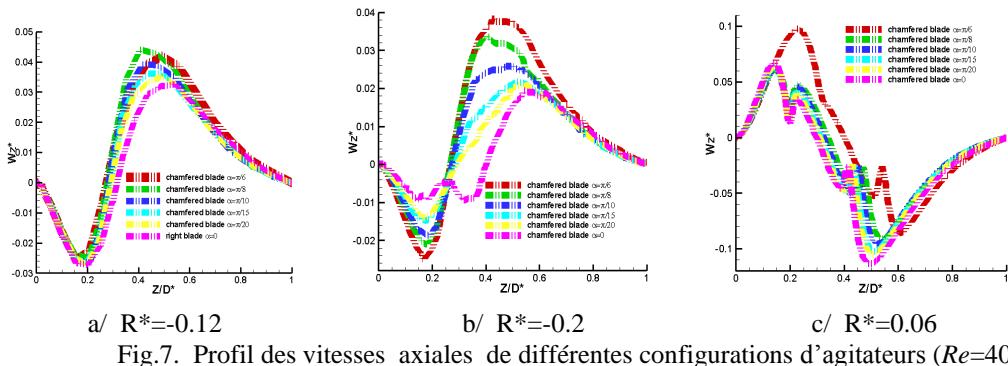
Au niveau des contours de l'évolution de la vitesse axiale sur le plan YZ, on remarque bien le cisaillement de l'écoulement au niveau du chanfreiné $\pi/6$, engendrant la destruction des zones mortes, des tourbillons qui ont pour effet la stagnation du fluide et par conséquent la consommation excessive de l'énergie voir (Fig.5) où le mobile droit consomme le plus d'énergie.

Les vortex (zones stagnantes) disparaissent de plus en plus qu'on augmente le Nombre de Reynolds, et ceci notamment au niveau du chanfreiné $\pi/6$ par rapport aux autres configurations où le processus s'effectue lentement.

On remarque aussi que le chanfreinage favorise la vitesse axiale par rapport à celle tangentielle notamment au niveau des quadripales chanfreinés, ses valeurs sont les plus élevées à ces niveaux là, ce qui implique un bon entremêlement et une bonne répartition du milieu fluide le long de la hauteur de la cuve à mobile chanfreiné, par rapport à l'agitateur droit où la répartition de la masse fluide s'effectuera lentement.

Les vortex ou bien les zones stagnantes (tourbillons) situés notamment aux alentours de la quadripale droite (Fig.6), diminuent de volume au fur et à mesure qu'on augmente le chanfreinage, on remarque bien qu'au niveau de la quadripale chanfreinée $\pi/6$ le cisaillement de ces vortex est visiblement claire (Fig.6).

Profil de la vitesse axiale

Fig.7. Profil des vitesses axiales de différentes configurations d'agitateurs ($Re=40$)

Le profil de la vitesse axiale le long de la hauteur de la cuve montre que les valeurs maximales de cette vitesse sont principalement au niveau des quadripales chanfreinées principalement le chanfrein $\pi/6$ sur de différents rayons, confirmant ainsi la (Fig.6).

Evolution des contours des isovaleurs et des lignes de courants en fonction du Re
Pour un $Re=5$, dans le plan YZ

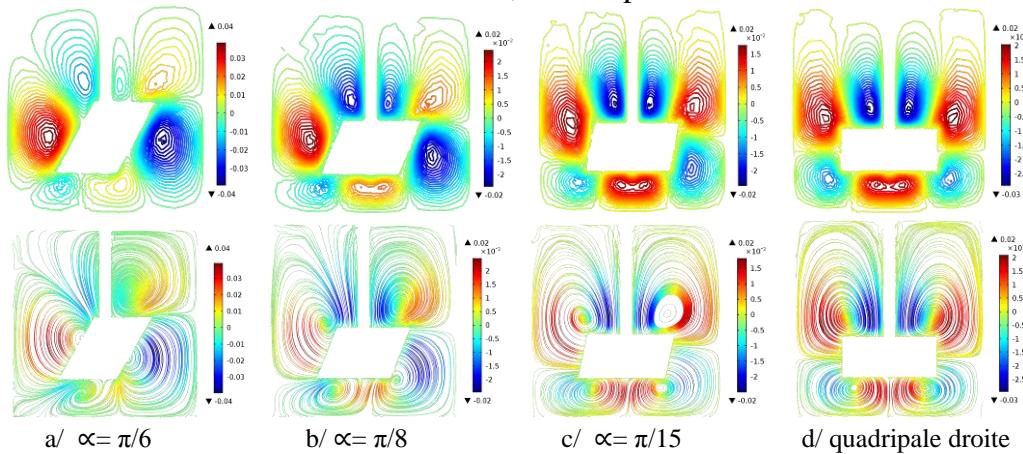
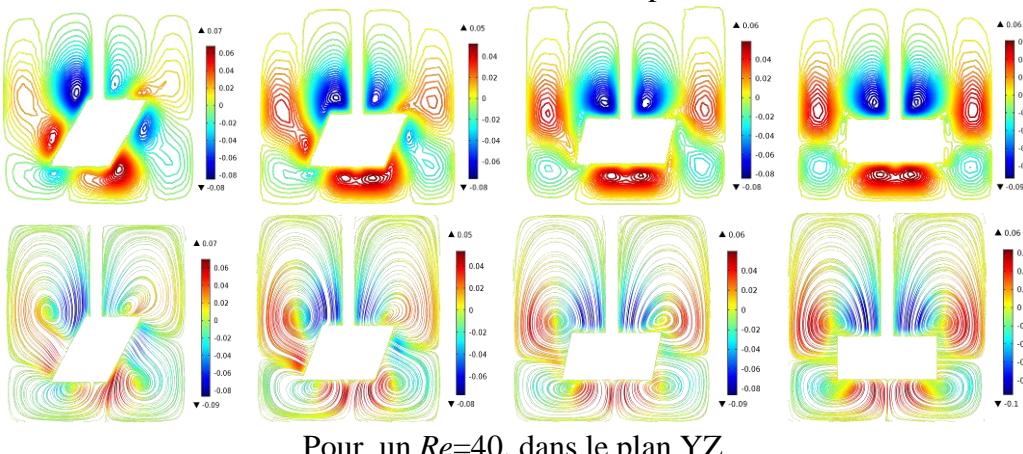


Fig.8. Contours des isovaleurs et des lignes de courant de la vitesse axiale de différentes configurations d'agitateurs pour un $Re(5)$

Pour un $Re=20$, dans le plan YZ



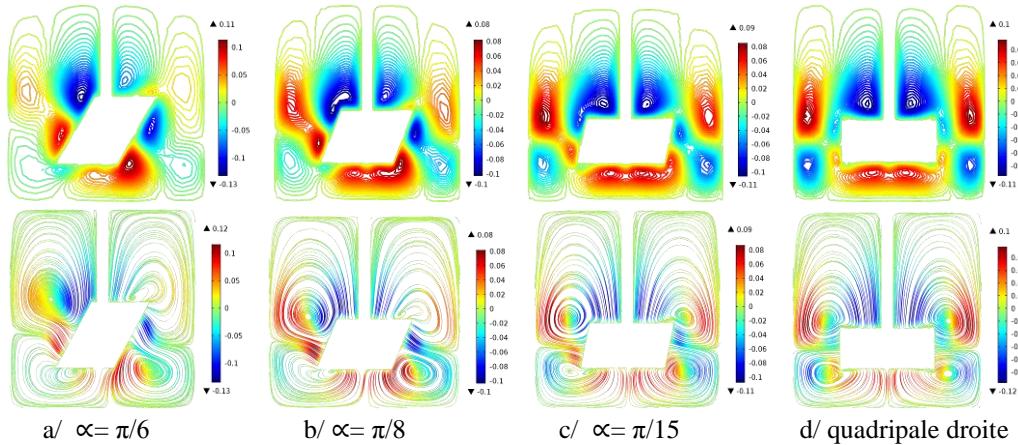
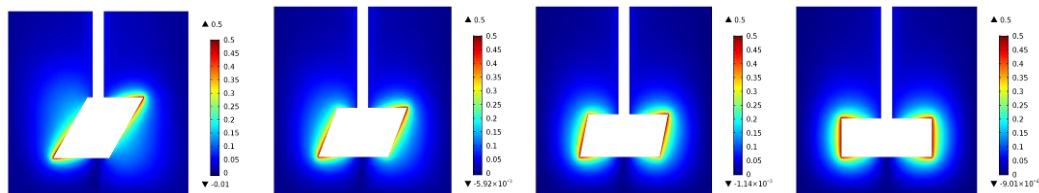


Fig.9. Contours des isovaleurs et des lignes de courant de la vitesse axiale de différentes configurations d'agitateurs pour des $Re(20, 40)$

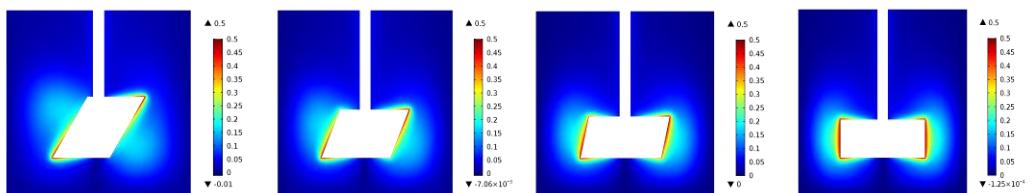
Les contours des isovaleurs et des lignes de courants Fig(8,9) démontrent clairement l'effet du chanfreinage sur l'évolution de la vitesse axiale, leur variation augmente avec l'augmentation du Re pour les quatre configurations. Le cisaillement des vortex, par conséquent celui de la masse du fluide et des zones stagnantes et la bonne répartition de l'écoulement le long de la hauteur sont visiblement clairs au niveau des pales chanfreinées principalement le $\pi/6$ par rapport à celle droite.

Variation de la vitesse tangentielle

V_θ^* Dans le plan YZ : Pour un $Re=05$



Pour un $Re=20$,



Pour un $Re=40$

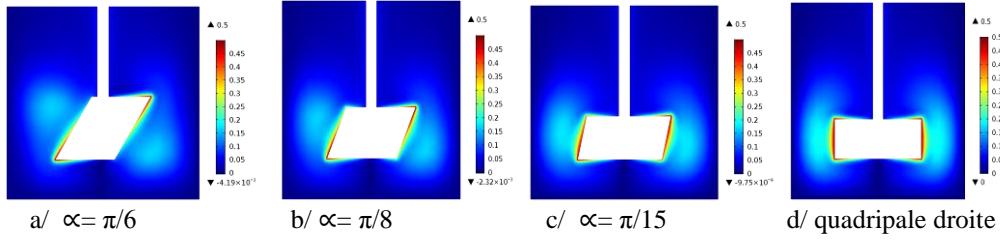


Fig.10. Contours de la vitesse tangentielle de quatre configurations de mobiles

On remarque (Fig.10) qu'au fur et à mesure qu'on augmente le nombre de Re , la vitesse tangentielle tente de se répartir en vitesse axiale le long de la hauteur de la cuve, principalement au niveau des chanfreins, ce qui explique les constations des contours de la vitesse axiale (Fig.6), c'est-à-dire que le fluide est poussé (raclé) vers le haut et le bas de la cuve engendrant la bonne répartition de l'écoulement de la masse fluide.

Vitesse tangentielle dans le plan XY

Pour un $Re=40$, contours de la V_θ^* sur pale et prolongement

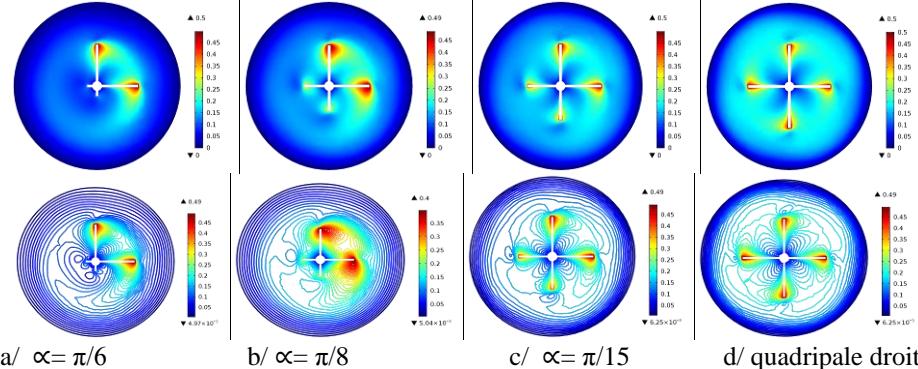


Fig.11. Contours de la vitesse tangentielle et de ses isovaleurs de quatre configurations de mobiles

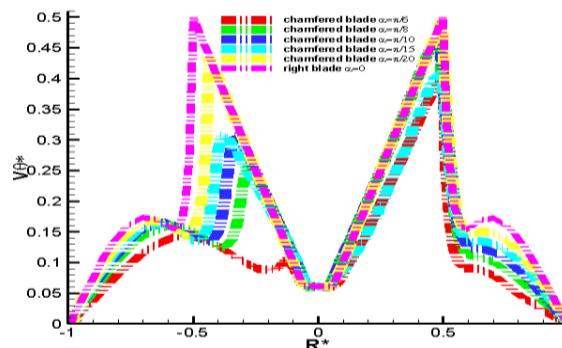
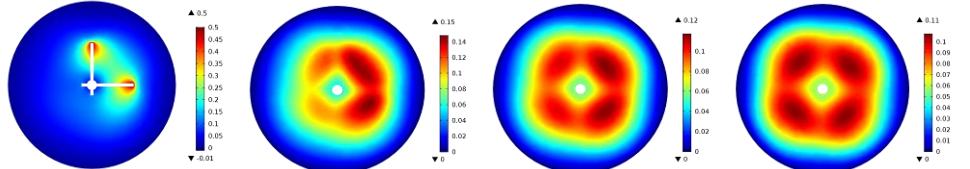


Fig.12. Profil de la vitesse tangentielle sur la pale et prolongement de différentes configurations de mobiles

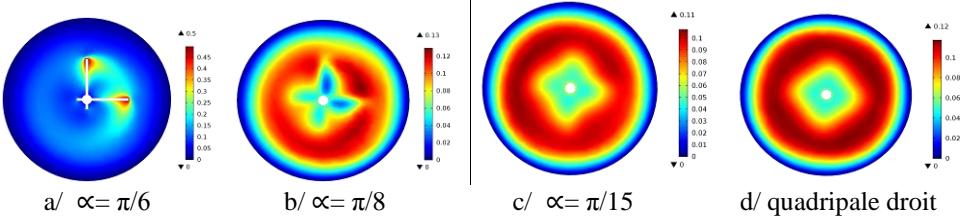
C'est une comparaison de variation du contour de la V_θ^* au niveau de la pale et prolongement de chaque degré de chanfrein ainsi que du droit, la quadripale

droite détient les valeurs maximales de la V_θ^* comme s'est démontré sur les (Figs. (11,12)).

Pour un $Re=05$, contours de la V_θ^* sur pale et prolongement du $\pi/6$



Pour un $Re=40$, contours de la V_θ^* sur pale et prolongement du $\pi/6$



a/ $\alpha = \pi/6$ b/ $\alpha = \pi/8$ c/ $\alpha = \pi/15$ d/ quadrupale droit

Fig.13. Contours de la vitesse tangentielle de quatre configurations de mobiles

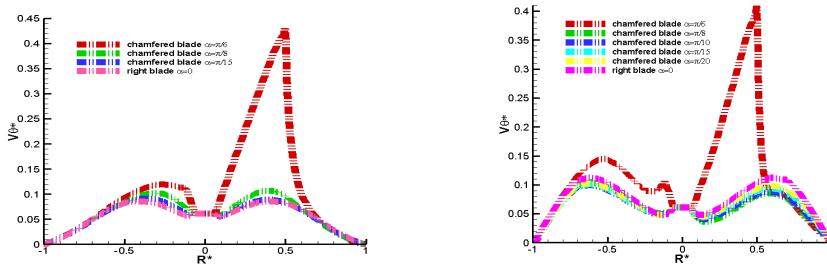


Fig.14. Profil de la V_θ^* sur pale prolongement du $\pi/6$, $Re5$ et $Re40$ des différentes configurations

La quadripale chanfreinée $\pi/6$ détient la valeur maximale de la V_θ^* sur sa pale et prolongement par rapport à toutes les autres configurations (Fig (13,14)).

6. Conclusion

Il s'agit d'une étude hydrodynamique comparative principalement entre deux mobiles chanfreinés et droits, n'ayant pas la même géométrie mais ayant la même surface, en faisant varier uniquement la hauteur de la lame chanfreinée et en balayant ainsi le même volume de fluide .En plus de ce qui a été dit dans les chapitres précédents de cet ouvrage, nous concluons également que :

Il a été démontré que l'agitateur chanfreiné $\pi/6$ consomme le moins d'énergie, il favorise une bonne répartition du débit en cassant et cisaillant les tourbillons et les zones mortes situés massivement au niveau de la cuve à pales droites, ce qui explique la consommation d'énergie excessive à ce niveau.

En perspective et en complément de cette étude hydrodynamique, il serait souhaitable de mener une étude de transfert de masse pour confirmer l'efficacité des pales chanfreinées notamment les lames chanfreinées $\pi/6$.

R E F E R E N C E S

- [1] *Pan Zhang*, Guanghui Chenb, Jihai Duanb, Weiwen Wangb,** Mixing characteristics in a vessel equipped with cylindrical stirrer Results in Physics 10 (2018) 699 -705 journal homepage: www.elsevier.com/locate/rinp
- [2] *Cui Y Y, Zhang H B, Li X W, Yang M J, Guan Z L.* Computational and experimental investigation of laminar flow mixing system in a pitched-blade turbine stirred tank. Int J Agric & Biol Eng, 2018; 11(4): 111–117.
- [3] *M.Kuriyama , H.Inomata, K. Arai , and S.Saito .* Numerical solution for the flow of highly viscous fluid in agitated vessel with anchor impeller, A.I.Ch.E. Journal. Vol. 28, N° 03, (1982), pp 385-391.
- [4] *J.Bertrand,* Agitation of viscous fluids case of mobile paddle, anchor and gates, Ph.D. Thesis, National Polytechnic Institute of Toulouse, 1983.
- [5] *J.Bertrand. and J.P.COUDERC,* Numerical study of flow generated by an anchor in the case of viscous Newtonian or pseudo-plastic fluids, Entropy No. 125/126 , 1985.
- [6] *A.Youcefí,* Experimental study of the flow of a viscoelastic fluid around a bladed stirrer stirred tank, PhD Thesis, Toulouse National Polytechnic Institute, 1993.
- [7] *Hiraoka.S, Yamada.I, and Mizoguchi.K,* Numerical analysis of flow behaviour of highly viscous fluid in agitated vessel, Chemical Engineering of Japan, 11, 6, (1978),pp 487-493.
- [8] *Hiraoka.S, Yamada.I, and Mizoguchi.K,* Two dimensional model analysis of flow behaviour highly viscous non-newtonian fluid in agitated vessel with paddle impeller, Chemical Engineering of Japan, 12, 1, (1979), pp56-62.
- [9] *D.Anne Archard ,* Numerical simulation of flow generated in a tank with a bladed stirrer with a finite element method , Internal Report No. 88-7 Toulouse National Polytechnic Institute , 1988.
- [10] *D.Anne Archard, H.C.Boisson, H.HA-Minh,* Finite element simulation of rotating flow of a viscoelastic fluid, XI th International Congress on Rheology. Brussels, Belgium, 1992.
- [11] *C.Kuncewicz,* Three-dimensional model of laminar liquid flow for paddle impellers and flat-blade turbines, Chemical Engineering Science, Vol. 47, No. H/16, (1992), pp. 3959-3967.
- [12] *R.M.Hockey, and J.M Nouri,* Turbulent flow in a baffled vessel stirred by a 60 ° pitched blade impeller, chemical Engineering Science, Vol. 51, No. 19, (1996), pp. 4405 4421.
- [13] *Youcefí. A, Anne-Archard. D, Boisson. H and Sengelin.M,* On the influence of liquid elasticity on mixing in a vessel agitated by a two-bladed impeller. J Fluids Eng, vol. 119 N°3, (1997), pp. 616-622.