

Analyse des phénomènes d'entrée et de bord à travers un écoulement confiné entre deux disques coaxiaux.

A.NOUREDDINE^a, F.Z. MEDJAOU^b

Laboratoire de Mécanique Appliquée de Faculté de Génie Mécanique U.S.T.Oran.Mohamed Boudiaf BP
1505 Oran El M'naouer(ALGERIE) a.e-mail : redkanour@yahoo.fr- b.e-mail: medjaouifaz@yahoo.fr

Résumé :

Ce travail constitue une analyse des effets d'entrée liés à la valeur finie de la dimension radiale des deux disques coaxiaux type rotor-stator. La mise en œuvre de la technique de visualisation de l'écoulement pariétal par dépôt électrochimique a donné de bons résultats dans différents types d'écoulements. Les lignes de courant pariétales visualisées en utilisant cette technique nous ont permis de mettre en évidence les différents éléments caractérisant la nature centripète de l'écoulement au voisinage du disque fixe.

Les résultats expérimentaux ainsi obtenus montrent bien l'existence des phénomènes d'entrée et de bord à travers l'écoulement pariétal d'un fluide entre un disque tournant et un disque fixe. Ces phénomènes sont liés d'une part à la valeur finie de la dimension radiale des deux disques et la présence du disque fixe où l'écoulement est de nature centripète.

Abstract:

This work constitutes an analysis of the effects of entry related to the finite value of the radial dimension of the two coaxial discs rotor-stator type. The implementation of the technique of visualization of the parietal flow by electrochemical deposit gave good results in different types of flows. The parietal streamlines visualized by using this technique enable to highlight the various elements characterizing the centripetal nature of the flow in the vicinity of the fixed-head disk.

The experimental results obtained show clearly the existence of the phenomena of entry and edge through the parietal flow of a fluid between a revolving disc and a fixed-head disk. These phenomena are related on the one hand to the finite value of the radial dimension of the two discs and the presence of the fixed-head disk where the flow is of centripetal nature.

Mots clefs: Dépôt électrolytique, Visualisation, Ecoulement pariétal, fluide visqueux incompressible, Disque fixe et Disque tournant, Effets d'entrée ou de bord.

1 Introduction

Les écoulements confinés entre un disque tournant (le rotor) et un disque fixe (le stator) de dimension radiale finie présentent un intérêt certain dans des domaines industriels tels que la thermique (échangeurs de chaleur), le génie chimique (cellules d'électrolyse) le génie mécanique (pompes, ventilateurs, turbomachines). La mise en œuvre de la technique de visualisation de l'écoulement pariétal par dépôt électrochimique a donné de bons résultats dans différents types d'écoulements et en particulier dans le cas des solides en rotation [1, 2, 3, 4]. Cette technique est basée sur le principe du transfert de masse vers une surface de réaction de l'électrode sur laquelle on veut visualiser l'écoulement du fluide étudié.

Le but de ce travail est de préciser leur étendue à partir de la configuration des lignes de courant pariétales au voisinage du disque fixe où est l'écoulement est centripète. Lors de l'électrolyse d'une solution de sulfate de cuivre entre deux électrodes métalliques, l'électrode portée au potentiel négatif (cathode) se recouvre progressivement d'une pellicule de cuivre. Le dépôt de Cu obtenu à la surface de la cathode présente une surface parfaitement unie pour des densités de courant d'électrolyse normales même en présence d'un mouvement relatif de l'électrode par rapport à la solution. Notre cas est celui de l'écoulement entre un disque tournant et un disque fixe.

Lorsque l'épaisseur de la couche de diffusion est petite devant celle de la couche limite dynamique, on peut démontrer [1, 2, 3, 4] qu'à l'intérieur de la couche de diffusion, les lignes de courant peuvent être

pratiquement confondues avec les lignes de courant pariétales de la couche limite dynamique au sein de laquelle le fluide a les mêmes propriétés physiques que le fluide extérieur. Ainsi les sillons qui se forment à la surface de l'électrode au bout de quelques minutes d'électrolyse, correspondraient aux lignes de courant pariétales.

2 Position du problème

On considère l'écoulement d'un fluide visqueux incompressible entre deux disques coaxiaux, parallèles dont l'un est en rotation. On suppose que le régime est laminaire et permanent. On désigne respectivement par ρ la masse volumique et ν la viscosité cinématique du fluide. Le disque tournant est situé à la cote $z^*=e^*$ et tourne autour de l'axe Oz^* avec une vitesse angulaire constante ω . Le disque fixe est situé à la cote $z^*=0$ (figure 2.1).

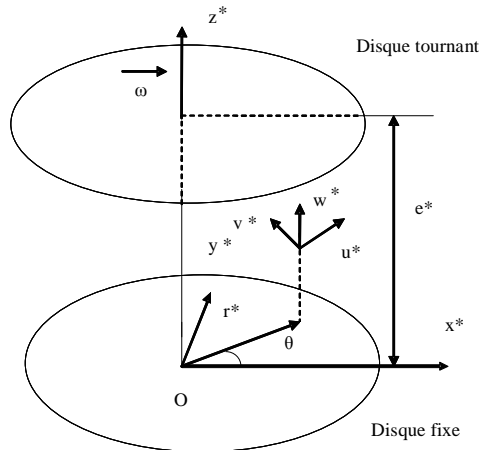


FIG. 2.1- schéma du problème

Compte tenu des hypothèses, les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité s'écrivent :

$$\overline{\text{grad } \vec{V}^* \cdot \vec{V}^*} = -\frac{1}{\rho} (\text{grad } p^*) + \nu \Delta \vec{V}^* \quad (2-1)$$

$$\text{div } \vec{V} = 0$$

$p^*(r^*, \theta, z^*)$ désigne la pression motrice au point $M(r^*, \theta, z^*)$.

Les conditions aux limites sont :

$$\vec{V}^*(r^*, \theta, 0) = \vec{0} \quad (2-2)$$

$$\vec{V}^*(r^*, \theta, e^*) = \omega r^* \vec{j}$$

Les données dimensionnelles du problème sont au nombre de 4 : e, ω, μ, ρ . Afin d'obtenir la représentation dimensionnelle la plus intéressante sur le plan physique, nous choisirons les grandeurs de référence de la façon suivante :

$$L = e^* \quad V = \omega e^*$$

On définit alors les quantités sans dimensions :

$$\vec{V} = \frac{\vec{V}^*}{V} \quad p = \frac{p^*}{\mu\omega} \quad \vec{OM} = \frac{\vec{OM}^*}{L} \quad z = \frac{z^*}{L} \quad r = \frac{r^*}{L}$$

En reportant ces grandeurs dans les équations (2.1) et les conditions aux limites (2.2), on obtient les relations adimensionnelles correspondantes :

$$\text{Re} \cdot \overline{\text{grad } \vec{V} \cdot \vec{V}} = -\text{grad } p + \Delta \vec{V} \quad (2-3)$$

$$\text{div } \vec{V} = 0$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned}\vec{V}(r, \theta, 0) &= \vec{0} \\ \vec{V}(r, \theta, 1) &= r \vec{j}\end{aligned}\quad (2-4)$$

2.1 Recherche d'une solution

Le problème régi par les systèmes (2.3) et (2.4) ressemble à un type de problème déjà traité au moyen de solutions exactes de l'équation de Navier-Stokes [5]. Il existe une solution affine du problème, obtenue en posant :

$$\begin{aligned}u &= r \cdot f'(z, \text{Re}) \\ v &= r \cdot g(z, \text{Re})\end{aligned}\quad (2-5)$$

$$w = -2f'(z, \text{Re})$$

$$p = r^2 h(z, \text{Re}) + l(z, \text{Re})$$

Le programme de calcul utilisé a permis d'obtenir les fonctions du système jusqu'à une valeur du nombre de Reynolds de rotation de 270 [6]. La direction du vecteur vitesse en un point quelconque de l'écoulement se déduit en fonction des composantes u et v ; si on désigne par α_F l'angle formé par ce vecteur vitesse et la direction radiale centrifuge comme le montre (figure 2.2); α_F est donnée par la relation :

$$\forall r, \alpha_F(r, z, \text{Re}) = \text{Arctg} \frac{v(r, z, \text{Re})}{u(r, z, \text{Re})} = \text{Arctg} \frac{g(z, \text{Re})}{f'(z, \text{Re})}\quad (2-6)$$

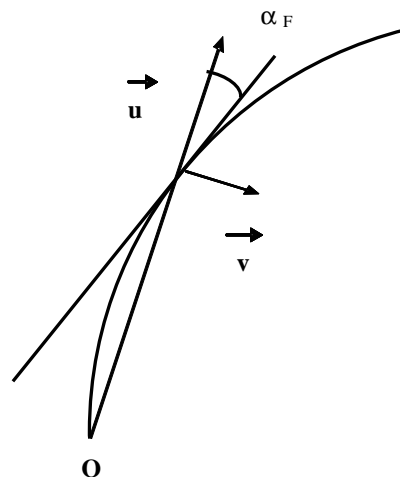


FIG. 2.2- Ligne de courant pariétal

Dans le cas où le repère angulaire est lié au disque tournant à la vitesse angulaire ω , l'angle α_T correspondant est donné par :

$$\forall r, \alpha_T(r, z, \text{Re}) = \text{Arctg} \frac{v(r, z, \text{Re}) - v(r, 1, \text{Re})}{u(r, z, \text{Re})} = \text{Arctg} \frac{g(z, \text{Re}) - g(1, \text{Re})}{f'(z, \text{Re})}\quad (2-7)$$

avec $\forall r, v(r, 1) = 1$

Les lignes de courant pariétales à la surface des disques fixe et tournant correspondent à des angles α_{FP} et α_{TP}

$$\text{tels que :} \quad \forall r, \alpha_{FP} = \lim_{z \rightarrow 0} \alpha_F(r, z, \text{Re}) = \text{Arctg} \frac{g'(0, \text{Re})}{f''(0, \text{Re})}\quad (2-8)$$

$$\forall r, \alpha_{TP} = \lim_{z \rightarrow 1} \alpha_T(r, z, \text{Re}) = \text{Arctg} \frac{g'(1, \text{Re})}{f''(1, \text{Re})}\quad (2-9)$$

où z et r sont les coordonnées axiale et radiale respectives et Re étant le nombre de Reynolds de rotation tel que :

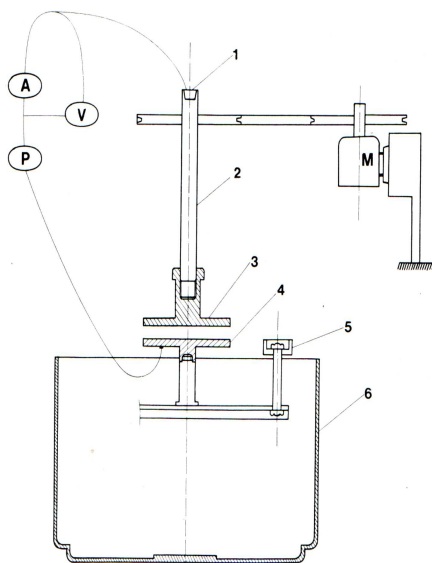
$$Re = \frac{\omega \cdot e^{*2}}{\nu} \quad (2-10)$$

où ω est la vitesse de rotation, e^* est l'épaisseur du jeu entre les deux disques et ν la viscosité cinématique du fluide utilisé.

3 Montage expérimental

Le dispositif utilisé lors des essais est schématisé figure 3.1. L'ensemble disque fixe disque tournant dont l'écartement et le parallélisme ont été réglés au préalable sont placés à l'intérieur d'une cuve cylindrique de 500 mm de diamètre et de 300mm de hauteur. Ce récipient qui contient la solution électrolytique repose sur un plateau doté d'un mouvement vertical d'amplitude maximum 2540 mm. Ce système de déplacement utilisant un vérin pneumatique, il permet de placer les disques au sein du bain d'électrolyse avant chaque opération de visualisation et de le dégager rapidement à la fin de chaque expérience afin de procéder à l'observation. Chaque disque a un diamètre de 166 mm et a été réalisé en deux exemplaires, l'un en cuivre et l'autre en duralumin. Le disque en duralumin est utilisé comme cathode lorsqu'on désire visualiser l'écoulement pariétal sur ce même disque. Le disque de cuivre joue au contraire le rôle d'anode pour obtenir une visualisation sur le disque opposé.

Le disque tournant est fixé à l'extrémité d'un arbre vertical. Cet arbre est relié à un bâti par un ensemble de deux paliers munis de roulements à billes qui lui assurent une liberté de rotation. Ce dispositif associé à différents rapports de diamètres des poulies a permis d'obtenir des vitesses de rotation du disque comprises entre 1,1tr/s et 9,10 tr/s. Le contrôle de cette vitesse est assuré de manière continue lors d'un essai par l'intermédiaire d'une cellule photoélectrique associée à un compte tours électronique. L'erreur relative ainsi commise sur la mesure de N est inférieure à 0,5%. Le disque fixe est solidaire d'un système de déplacement micrométrique suivant trois directions orthogonales.



A : ampèremètre- M : moteur- P : potentiomètre- V : voltmètre
1 : contact électrique tournant- 2 : arbre tournant- 3 : disque tournant- 4 : disque fixe- 5 : support de disque fixe- 6 : cuve d'électrolyse.

FIG. 3.1- Montage expérimental

(1)

4 Lignes de courant pariétales sur le disque fixe

Des mesures de l'angle α_{FP} entre la tangente aux lignes de courant pariétales et le rayon vecteur ont également été effectuées à partir du dépôt électrolytique sur la surface du disque fixe (figure 4.1). Il faut souligner que dans ce cas de nombreuses visualisations comportent seulement quelques lignes de courant qui ne s'étendent pas à toute la surface du disque fixe.

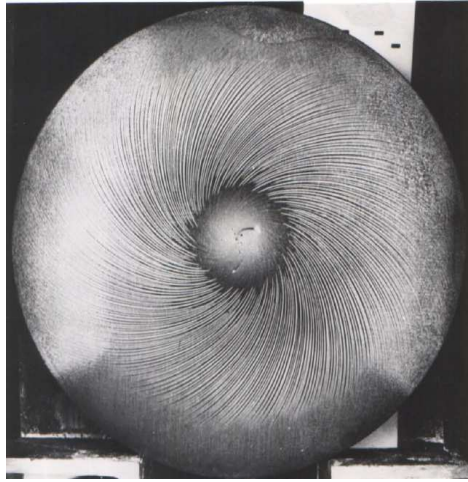


FIG.4. 1 – Visualisation des lignes courant pariétales sur le disque fixe

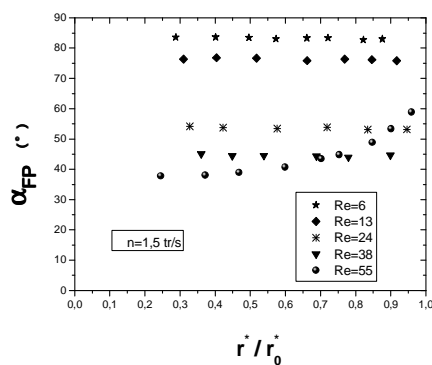
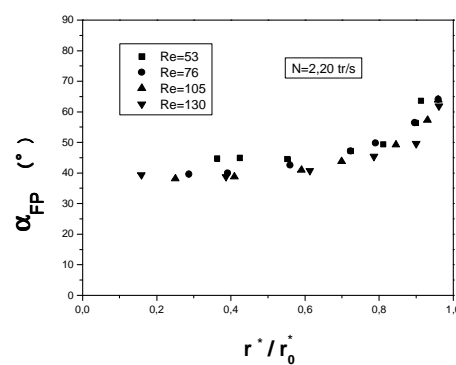
4.1 Distribution radiale de l'angle α_{FP}

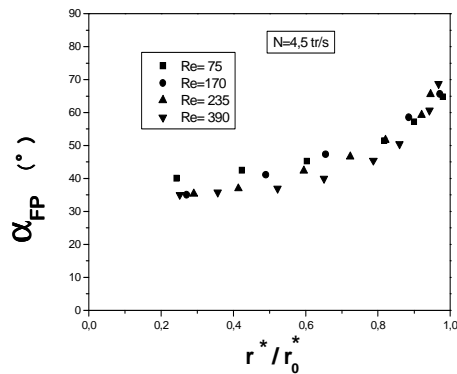
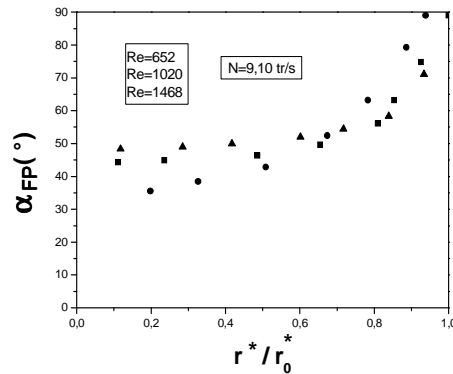
Quatre séries de distributions radiales de l'angle α_{FP} sont illustrées par les figures 4.2 à 4.5, chacune d'elles correspond à une vitesse de rotation donnée du disque tournant [6]. Pour une même série, les expériences ont été réalisées pour plusieurs valeurs de l'épaisseur du jeu e entre les deux disques.

Pour les petites nombres de Reynolds de rotation (vitesse de rotation ou épaisseur du jeu faible), l'angle α_{FP} est indépendant de la coordonnée radiale sur pratiquement toute la surface du disque. Cette propriété est bien illustrée par la figure 4.2, elle correspond à une très petite valeur de vitesse de rotation égale à 1,5 tr/s. L'ordonnée des droites ainsi obtenues est, comme dans le cas du disque tournant [6] une fonction décroissante du nombre de Reynolds. Le même phénomène est observé pour des vitesses de rotation plus grandes tant que le nombre de Reynolds de rotation demeure inférieur à environ 50 (figures 4.2 à 4.3). Au-delà de cette valeur, l'angle α_{FP} prend tout d'abord une valeur constante au voisinage de l'axe de rotation puis croît avec la coordonnée radiale. Le rayon du disque où la courbe $\alpha_{FP}(r)$ présente un palier diminue lorsque Re augmente (figure 4.4)

D'une part, dans la région annulaire comprise entre $r = 0,65$ et $r = 1$, α_{FP} est une fonction croissante de r . D'autre part, pour une valeur donnée de r telle que $0,65 < r < 1$, α_{FP} augmente subitement quand la vitesse de rotation augmente. Ces derniers résultats traduisent l'existence des effets d'entrée ou de bord dans une région annulaire beaucoup plus importante que celle du disque tournant. La présence du disque fixe ne fait qu'augmenter ces phénomènes.

La même allure des distributions de l'angle $\alpha_{FP}(r)$ peut être observée aux grandes valeurs de la vitesse de rotation comme le montre les figures 4.4 et 4.5. Ainsi pour une vitesse de rotation donnée ω et un paramètre de confinement e (l'épaisseur), on note que la combinaison de ces paramètres met en évidence les effets de bord qui eux sont liés aussi à la dimension radiale finie du disque.

FIG.4.2 - Variation de α_{FP} pour $N=1,5$ tr/sFIG.4.3 - Variation de α_{FP} pour $N=2,20$

FIG.4.4 - Variation de α_{FP} pour $N=4,5$ tr/sFIG.4.5 - Variation de α_{FP} pour $N=9,10$ tr/s

5. Conclusion

Cette variation de l'angle en fonction du rayon du disque fixe traduit l'existence de phénomènes d'entrée ou de bord liés à la dimension radiale finie des disques. A ce niveau, la valeur de l'angle α_{FP} , au lieu de demeurer constante comme l'exigerait la propriété d'affinité du champ des vitesses dans le cas des disques de rayon infini, augmente avec r . En effet la solution contenue dans la cuve cylindrique est entraînée sous l'effet de la viscosité par le mouvement de rotation des parois supérieure et latérale du disque tournant ainsi que celui du liquide en provenance du voisinage de la paroi inférieure du disque tournant. D'autre part des mesures du champ des vitesses effectuées à la périphérie du jeu par vélocimétrie Laser [7] montrent qu'une proportion importante de l'écoulement centrifuge de la couche limite du disque tournant est recirculée au niveau du disque fixe. Ce fait traduit que l'utilisation de disque de rayon fini entraîne soit une diminution de la vitesse radiale, soit une augmentation de la vitesse tangentielle relative du fluide par rapport au disque tournant, soit une combinaison des deux phénomènes. D'autres chercheurs comme S.Poncet, M.P.Chauve, & R.Schiestel (2005) [8] ont pu analyser et décrire ce type de structure de l'écoulement à deux couches limites séparées par un fluide en rotation et celle d'un écoulement de type Stewartson avec une couche limite unique sur le disque fixe (rotor). La combinaison de ces deux structures de l'écoulement et l'utilisation de disque de rayon fini entraînent soit une diminution de la vitesse radiale, soit une augmentation de la vitesse tangentielle relative du fluide par rapport au disque tournant, soit une combinaison des deux phénomènes.

References

- [1] Laghouiter F., Dagenet A., Bodiou D. and Dagenet M., Visualisation électrochimique des lignes de mouvement pariétales d'un fluide. Application à la mise en oeuvre de la dimicroélectrode. J.Cim. Phys. 72 N° 2, 1975.
- [2] Dagenet M., Peube J-L., Sur une méthode de visualisation des lignes de courant pariétales. C.R. Acad. de Paris. T. 272 P. 351-354, série A. 1971.
- [3] Bousgarbies J-L and Renaud A., Study of the wall streamlines inside an annular cavity with two rotating walls-flow visualization II, Wolfgang Merzkirch P. 641-645. 1982.
- [4] Noureddine A., Application de la technique de visualisation par dépôt électrolytique à l'écoulement d'un fluide visqueux entre un disque tournant et un disque fixe. CIMASI'96, Casablanca, Maroc, 1996.
- [5] Pécheux J., Contribution à l'étude de l'écoulement entre deux disques produit par débit radial, rotation, Soufflage ou Aspiration. Thèse de Docteur ès Sciences. Poitiers, France. 1976
- [6] Noureddine A., Ecoulement turbulent entre un disque tournant et un disque fixe, influence des phénomènes d'entrée liés à la valeur finie des rayons 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France, 2007.
- [7] Oliveira L.A., Contribution à l'étude de l'écoulement entre un disque fixe et un disque tournant; influence des phénomènes d'entrée liés à la valeur finie des rayons. Thèse de Docteur Ingénieur-Poitiers-France, 1981.
- [8] Poncet S., Chauve M.P., & Schiestel R. Ecoulements tournants : de Batchelor à Stewartson. 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, 2005.