

L'ETUDE THEORIQUE DU PROCESSUS D'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE NON-NEWTONIEN DANS LA ZONE D'ALIMENTATION DES PALIERS HYDROSTATIQUES

Alexandru Valentin RADULESCU

Université "POLITEHNICA" de Bucarest, ROUMANIE,

e-mail: sandu@meca.omtr.pub.ro

Resume: Le processus d'écoulement des fluides non-newtoniens est étudié à l'aide des équations de Navier-Stokes, résolues par la méthode des éléments finis. Le modèle rhéologique valable pour les fluides est le modèle rhéologique loi de puissance. Pour le cas étudié, on a mis en évidence les lignes de courant théoriques et on les a comparés avec les résultats expérimentales.

1. INTRODUCTION

Dans le monde technologique actuel, l'activité concernant l'amélioration de la modélisation de l'écoulement dans les zones d'alimentation est vivement soutenue. Les études numériques et expérimentales aident généralement à la compréhension de la physique du mélange entre le fluide frais d'alimentation et le fluide recyclé, et à la prédiction de pertes de pression dues à l'inertie et ses effets sur la dynamique et le comportement thermique dans les paliers. Si de nombreuses recherches ont été réalisées sur les performances et la définition géométrique des paliers en utilisant les équations de base de la mécanique des films minces visqueux [1, 2], très peu d'entre elles traitent le mécanisme particulier de l'écoulement dans ces zones d'alimentation, et encore moins leurs dimensionnement.

Le bon fonctionnement d'un palier lisse implique la présence constante d'un film lubrifiant intercalé dans les divers éléments du contact. L'alimentation en lubrifiant frais est par conséquent un facteur décisif dans le comportement du palier. Au début, on a considéré les problèmes concernant le processus d'écoulement des fluides newtoniens dans des divers discontinuités: la zone d'entre d'un palier hydrodynamique, [3], la poche d'un palier axiale hydrostatique, [4, 5], la zone du saut pour le palier de Rayleigh, [6] ou pour les étanchements avec des labyrinthes, [7].

Les résultats théoriques obtenus ont été généralement valides de point de vue expérimentale, en visualisant l'écoulement et en déterminant les profils de vitesses correspondants. En utilisant des traceurs, les auteurs ont montré la formation des zones de recirculation secondaires en amont et en aval du jet entrant et d'une autre zone de recirculation dans la section aval de la poche. Cette dernière zone devient particulièrement dominante au fur et à mesure que la vitesse de l'arbre augmente et seule une couche mince de fluide, attachée à l'arbre tournant, est portée à travers la surface de la cavité.

Une fois avec la mis au point des méthodes d'études spécifiques pour tels procès d'écoulements, on a commence a analyser le comportement des fluides non-newtoniens, caractérisés par le modèle loi de puissance, [8], le modèle de Bingham, [9]

ou le modèle de Maxwell, [10]. Le but des études a été soit la réduction de la perte de charge dans le cas du transport des fluides par les tuyaux, soit l'étude de l'écoulement dans un palier de Rayleigh, soit l'écoulement dans les discontinuités caractéristiques pour les étanchements.

Dans le souci d'apporter des informations complémentaires, on a entrepris cette étude théorique du processus d'écoulement d'un fluide non-newtonien dans la zone d'alimentation des paliers hydrostatiques.

2. LES EQUATIONS DE NAVIER-STOKES POUR UN FLUIDE MODELE RHEOLOGIQUE LOI DE PUISSANCE

Pour le cas des fluides non-newtoniens modèle rhéologique loi de puissance, l'équation constitutive tridimensionnelle devient, [11]:

$$\overline{T} = 2m(-4D_{II})^{\frac{n-1}{2}} \overline{D} \quad (1)$$

Les équations Navier-Stokes ont été déduits pour le système des axes de coordonnées présenté dans la figure 1.

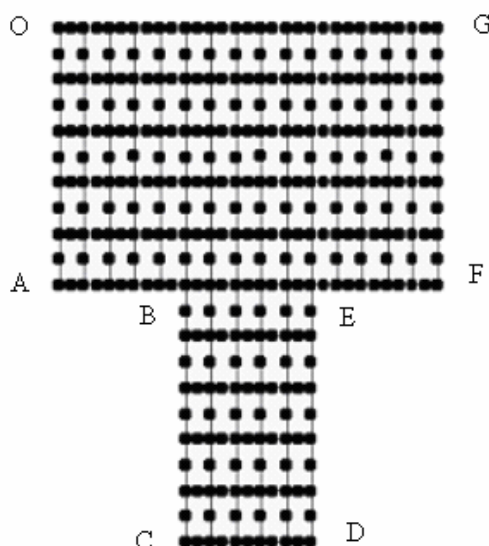
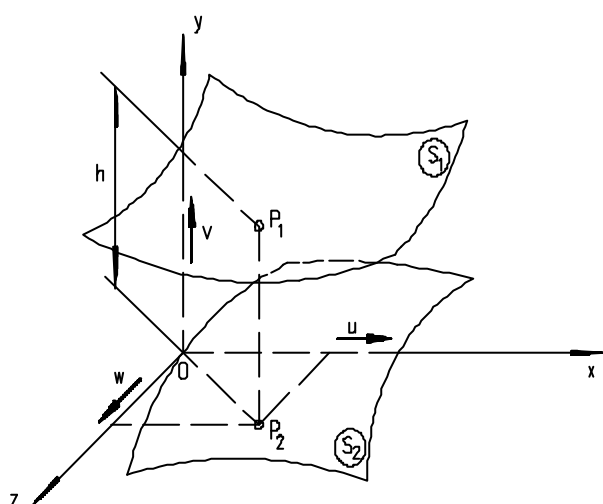


Figure 1 Le système des axes de coordonnées Figure 2 La géométrie de l'interstice

La forme des équations Navier-Stokes est:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2m(D^*)^{n-1} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[m(D^*)^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[m(D^*)^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[m(D^*)^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2m(D^*)^{n-1} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[m(D^*)^{n-1} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[m(D^*)^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[m(D^*)^{n-1} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2m(D^*)^{n-1} \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{où : } D^* = \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (3)$$

Pour obtenir les équations de mouvement qui caractérisent le processus d'écoulement d'un fluide, on rajoute aux équations de Navier-Stokes l'équation de continuité:

$$\frac{\int u}{\int x} + \frac{\int v}{\int y} + \frac{\int w}{\int z} = 0 \quad (4)$$

La résolution analytique des équations de mouvement pour les fluides non-newtoniens, modèle rhéologique loi de puissance, est possible seulement pour des écoulements simples, unidimensionnelles et sans discontinuités (le mouvement Couette ou Poiseuille). Pour des cas plus compliqués, bi ou tridimensionnelles, les solutions analytiques ne sont plus possibles et il faut utiliser les méthodes numériques, comme la méthode des éléments finis. Dr. Dominique Bonneau, de Laboratoire de Mécanique du Solide de l'Université de Poitiers, a mis au point le programme en éléments finis "ELFI", qui permet la résolution des équations Navier-Stokes pour un fluide non-Newtonian, quelle que soit géométrie de l'interstice, [12].

3. MODELISATION GEOMETRIQUE ET VALEURS INITIALES

Le modèle géométrique bidimensionnelle et les dimensions caractéristiques de la zone d'alimentation des paliers hydrostatiques sont présentés dans la figure 2. Pour ce cas ci, les équations de mouvement (2), (3) et (4) seront intégrées en considérant un processus d'écoulement laminaire et isotherme.

Les conditions aux limites sont:

$$\begin{aligned} & \text{- sur les frontières } \Gamma_{OA}, \Gamma_{AB}, \Gamma_{BC}, \Gamma_{DE}, \Gamma_{EF} \text{ et } \Gamma_{FG} : \begin{cases} u = 0 \\ v = 0 \end{cases} \\ & \text{- sur la frontière } \Gamma_{GO} : v = 0 \\ & \text{- sur la frontière } \Gamma_{DC} : v = 0 ; p = p_{alim} \end{aligned} \quad (13)$$

L'élément isoparamétrique utilisé a été un élément quadratique à 8 noeuds et 3 inconnus (u, v et p) par noeud, le nombre d'éléments finis étant 600 éléments pour l'entier domaine d'étude. La discrétisation de les équations par la méthode des éléments finis, choisie pour ses qualités de stabilité numérique et pour sa facilité de discrétisation des domaines complexes, conduit à un système d'équations algébriques fortement non linéaire.

Ce système est résolu en utilisant la méthode itérative de Newton-Raphson, associée à des techniques d'optimisation de stockage matriciel. En effet, une optimisation de la numérotation des noeuds du maillage est indispensable pour réduire la largeur de la bande de la matrice jacobienne. Enfin, le calcul et donc la triangularisation des matrices jacobiennes, très coûteux en temps de calcul, sont effectués à chaque itération.

Les principales caractéristiques géométriques de la poche d'alimentation sont :

- Diamètre du trou d'alimentation : 5 mm ;
- Diamètre de la poche : 20 mm ;
- Profondeur de la poche : 10 mm ;

La pression d'alimentation du palier hydrostatique a été imposée entre 0,2 et 0,5 MPa et le débit volumique a été constant, de 0,3 mm³/s.

Le lubrifiant utilisé est une huile TIN 125 EP2 aditivé avec des polymères, dont les caractéristiques sont :

- L'indice d'écoulement $n = 0,553$

- L'indice de consistance $m = 0,325 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$
- Masse volumique $r = 870 \text{ kg/m}^3$
- Température de référence $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

4. RESULTATS

Les lignes de courant dans le trou d'alimentation et dans la poche du palier ont été calculées pour deux différentes valeurs de la pression d'alimentation: 0,25 MPa et à 0,5 MPa. Les résultats sont présentés dans les figures 3 et 4, avec quelques détails sur la zone de recirculation.

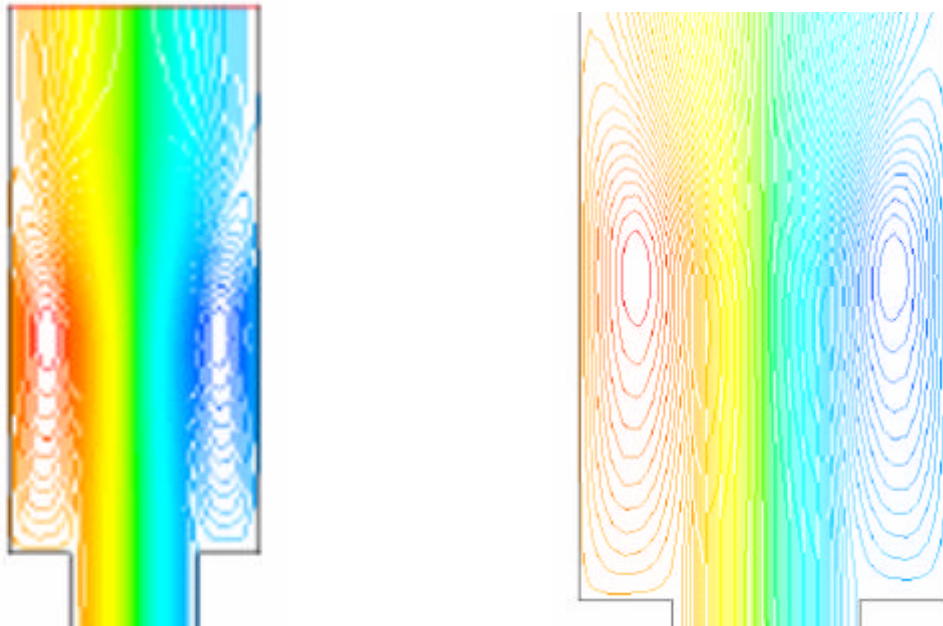


Figure 3 Les lignes de courant pour une pression de 0,25 MPa

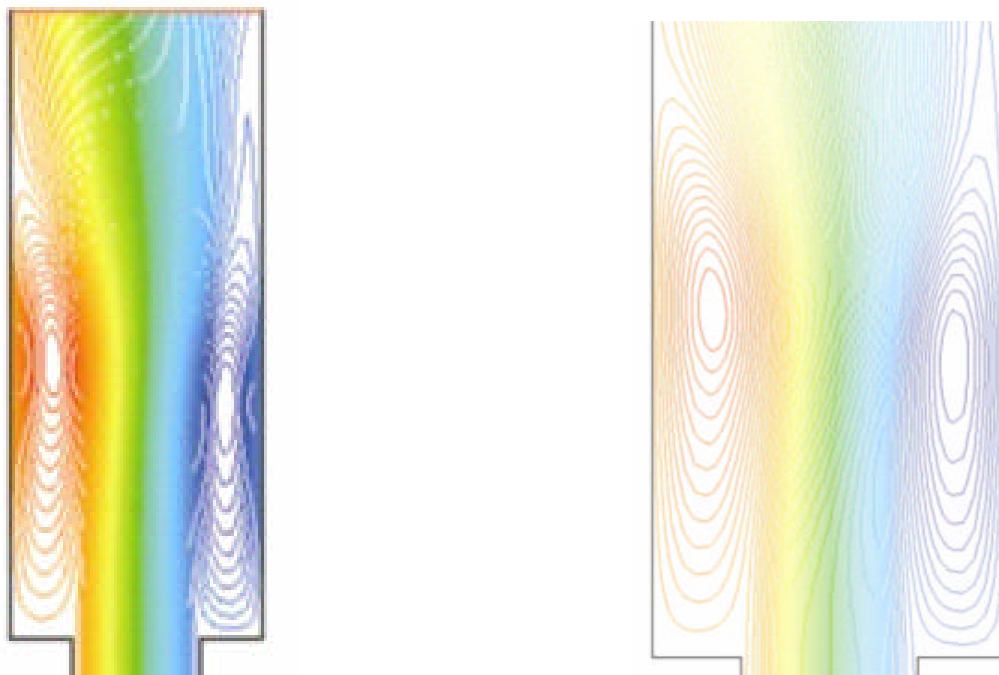


Figure 4 Les lignes de courant pour une pression de 0,5 MPa

En analysant les résultats, on peut constater une influence très importante de la pression en ce qui concerne la zone de recirculation dans la poche du palier hydrostatique. A faible pression d'alimentation, $p_{\text{alim}} = 0,25$ MPa, on observe la formation d'un tourbillon dans les coins de la poche, avec un élargissement moins important. Quand la pression d'alimentation augmente à 0,5 MPa, le tourbillon augmente comme dimensions, et la zone de recirculation présente une longueur plus importante.

Les résultats obtenus peuvent être validés à l'aide de divers cas de visualisation du processus d'écoulement, identifiés dans la littérature de spécialité. Dans la figure 5 on peut constater la forme et l'étendue de la zone de recirculation dans le cas d'un palier hydrostatique alimenté avec un fluide newtonien (huile ISO VG32), [4].

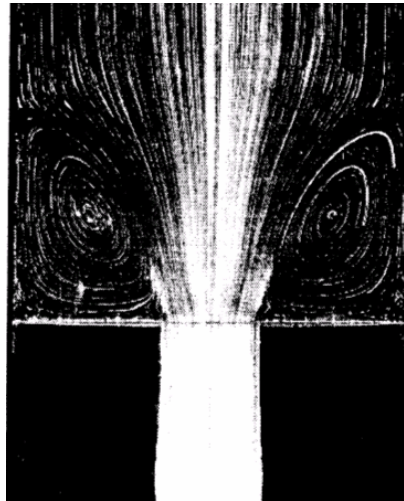
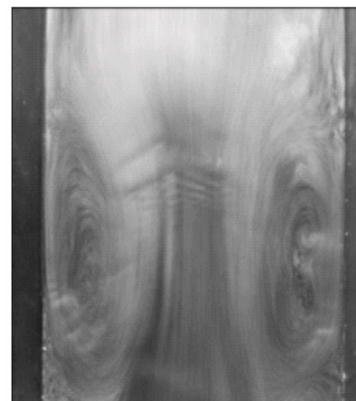
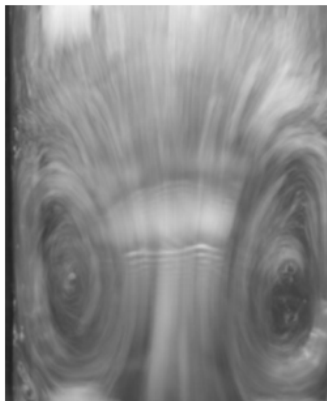


Figure 5 Visualisation du processus d'écoulement pour un fluide newtonien, [4]

Similaire, figures 6 a et b présentent des visualisations de l'écoulement pour le cas d'un fluide non-newtonien, avec divers pressions d'alimentation, [5].

On peut constater que la confrontation des résultats expérimentaux et numériques révèle une bonne corrélation des résultats.



a) $p_{\text{alim}} = 0,2 \text{ MPa}$

b) $p_{\text{alim}} = 0,7 \text{ MPa}$

Figure 6 Visualisation du processus d'écoulement pour un fluide non-newtonien, [5]

5. CONCLUSIONS

La comparaison qualitative des résultats expérimentaux avec ceux numériques issus du code de calcul, basé sur la résolution des équations bidimensionnelles de Navier-Stokes par éléments finis, montre un bon accord pour différentes pressions et débits d'alimentation.

Une bonne concordance qualitative est également observée en étudiant différentes géométries d'orifice d'alimentation aussi bien que divers fluides non-newtoniens.

Parmi les perspectives de cette modélisation numérique de l'écoulement hydrodynamique, il conviendrait de l'étendre au cas tridimensionnel afin d'obtenir des résultats plus précis qui seraient à comparer quantitativement à ceux obtenus expérimentalement.

REFERENCES

1. Frêne J., Nicolas D., Degueurce B., Berthe D., Godet M., Lubrification Hydrodynamique – Paliers et Butées. Collection de la DER EDF, Eyrolles, 1990.
2. Abdali, S.S. et al., Entry and exit flows of Bingham fluids, Journal of Rheology, Vol. 36, No.1, febr.1992, pp.389-407
3. Bonneau D., Formation du film lubrifiant dans les contacts à alimentation non surabondante - aspects expérimentaux et théoriques, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1986
4. Braun M. J., Batur C., Non-Intrusive Laser Based Full Field Quantitative Flow Measurements Aided by Digital Image Processing, Part 2: The Case of Hydrostatic Bearing, Tribology International, 1991, 24 (5), pp. 277-290
5. Dzodzo M. et al., Pressure and flow characteristics in a shallow hydrostatic pocket with rounded pocket/land joints, Tribology International, Vol.29, Nr.1, 1996, pp. 69-76
6. Al-Sanea S.A. et al., Computation of two-dimensional elliptic flows, including heat transfer, Computer methods in fluids, Pentech Press, London: Plymouth, 1980
7. Rhode D.L. et al., Labyrinth seal leakage resistance and visualization experiments in a novel, variable-configuration facility, Tribology Transactions, Vol. 36, Nr. 2, pp.213-218, 1993
8. Dolleans, P. Etude expérimentale d'écoulements de fluides viscoélastiques dans une conduite présentant une distribution périodique des brusques variations de section, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1996
9. Radulescu Al.V. et al., Etude expérimentale du champ des vitesses dans un palier de Rayleigh lubrifié à la graisse, 13^{ème} Congrès Français de Mécanique, Poitiers, pp.379-382, 1997
10. Azaiez, J. et al. Numerical simulation of viscoelastic flows through a planar contraction, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, No. 62, 1996, pp.35-54
11. Piau, J.M., Fluide non - newtonien, Technique de l'Ingénieur, A 710, Paris, 1983
12. Radulescu, Al.V., Bonneau, D., Hajjam, M., Theoretical Study of the Bi-dimensional Grease Flow Process in the Regions with Discontinuities, Lubrication Science, Vol. 15, No. 2, Febr. 2003, pp. 163-171