

ETUDE DES EFFETS DE LA POLLUTION SOLIDE DES HUILES LUBRIFIANTES SUR LES PERFORMANCES STATIQUES DES PALIERS HYDRODYNAMIQUES DES MACHINES TOURNANTES

H. Boucherit¹, M. Lahmar¹, H. Bensouilah¹, A. Mouassa

¹Laboratoire de Mécanique & Structures (LMS), Université 8 mai 1945-Guelma, Algérie, bouchrit_f@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Le travail proposé s'intéresse à l'étude théorique et numérique des effets de la pollution des huiles lubrifiantes sur les performances statiques des paliers compliants hydrodynamiques des machines tournantes. La méthode la plus simple pour décrire la structure microscopique ou macroscopique d'une huile lubrifiante polluée est de voir celui-ci comme une suspension des particules solides de forme sphères dans un solvant newtonien. Cette théorie peut être utilisée dans l'étude des effets des contaminants solides en lubrification. Les modèles rhéologiques les plus simples retenus dans cette étude sont le modèle d'Einstein, modèle de Batchelor et Green, modèle de Ball et Richmond et modèle de Phan-Thien et Pham. L'étude paramétrique réalisée, permet de mettre en évidence l'influence des effets de la pollution solide dans les huiles lubrifiantes sur le champ de pression dans le film, la déformée géométrique élastique du revêtement de surface du palier, les forces de frottement sur le coussinet et le début de fuite volumique moyen de palier.

Mots Clés : *pollution des huiles lubrifiantes, lubrification elastohydrodynamique (EHD), paliers fluides, lubrifiants non newtoniens.*

NOMENCLATURE

Symboles :

C jeu radial de palier, m
E module de Young, GPa
H épaisseur du film lubrifiant, m
L longueur du palier, m
R rayon de palier de l'arbre
P pression, Pa
U_r déplacement radial, m

Lettres grecques :

ν coefficient de Poisson
 ε excentricité relative de palier
 θ coordonnée circonférentielle
 Φ concentration volumique
 μ_s viscosité du solvant, Pa.s
 μ viscosité effective du fluide, Pa.s
 ω vitesse angulaire de l'arbre, rpm

1. INTRODUCTION

La contamination est la cause principale des pannes produites dans les machines tournantes et réductrices car, elle influe directement sur les propriétés du lubrifiant et la dégradation des organes de machines tournantes (paliers, roulements, engrenages, etc.). 75% des pannes des systèmes lubrifiés sont causées par la contamination, la plupart des composants machines sont endommagés par la pollution solide contenue dans les fluides lubrifiants. Au cours du fonctionnement, la pollution solide peut conduire jusqu'à l'arrêt total de l'installation. En effet, l'intensité de la détérioration des composantes de machines tournantes dépend

essentiellement du type de polluant, de la taille et du nombre des particules présentes entre les surfaces en contact et de la pression dans le film lubrifiant. Souvent une grande partie de ces particules solides est inférieure à 30µm qui ne sont pas détectables à l'œil nu, ceci signifie qu'un fluide propre à première vue peut être en réalité fortement pollué. Les huiles lubrifiantes utilisées contiennent de nombreux polluants avant même leur mise en service [1, 2]. Ces polluants sont présents dans les huiles lubrifiantes neuves ou introduits lors de la fabrication ou des opérations de montage même en service, de nouveaux polluants sont produits soit par le rodage et l'usure, soit par ingestion de l'extérieur selon l'étanchéité des joints et l'environnement de fonctionnement. Des filtres sont habituellement utilisés pour atténuer ces risques. Malheureusement, la filtration n'élimine pas complètement le problème car les petites particules ne sont pas toutes arrêtées. L'existence des polluants solides dans les huiles lubrifiantes est inévitable et jamais la filtration ne peut éliminer les petites particules existantes dans les fluides lubrifiants [1, 2, 3]. Au cours des dernières décennies, l'effet de contamination solide des huiles lubrifiantes est hautement reconnu comme un problème d'ingénierie sérieux et par conséquent a attiré l'attention de nombreux chercheurs. L'objectif principal de ce travail est tenté de modéliser et d'étudier les effets de la pollution solide des huiles lubrifiantes sur les performances statiques des paliers hydrodynamiques des machines tournantes.

2. EQUATIONS DE LA LUBRIFICATION HYDRODYNAMIQUE

2.1. Lois de comportement rhéologique des huiles lubrifiantes en film mince

La plus simple de ces lois de comportement rhéologique, qui présente le plus grand intérêt en lubrification, est celle du fluide newtonien. En lubrification et plus particulièrement en film mince où seulement les contraintes de cisaillement τ_{xy} et τ_{zy} sont prises en compte, les lois constitutives d'un fluide newtonien s'écrivent [4]:

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Où, u et w sont les composantes du vecteur vitesse d'écoulement d'une particule fluide selon l'axe x et z .

2.2. Théorie de suspension de particules solides dans un solvant

La méthode la plus simple pour décrire la structure des fluides avec des suspensions diluées des particules dans un solvant est de voir celui-ci comme une suspension des particules solides de forme sphères dans un solvant. La loi de comportement rhéologique du fluide newtonien (éq.1) reste la même seulement la valeur de la viscosité effective du fluide se change ; il s'agit de la théorie des suspensions diluées [5], dont les prémices remontent à 1960 avec les résultats d'Einstein, qui furent ensuite largement repris et modifiés.

a) Modèle d'Einstein

Les travaux d'Einstein en rhéologie portent sur les suspensions très diluées des sphères rigides de concentration volumique (Φ) dans un solvant newtonien de viscosité dynamique (μ_s) [5]. Einstein fut le premier à calculer l'évolution de la viscosité d'une suspension diluée en fonction de la fraction volumique, il propose la formule valable pour tout type d'écoulement du fluide pour une faible concentration volumique ($\Phi \leq 15\%$) [6 7]:

$$\mu = \mu_s (1 + 2.5 \times \Phi) \quad (2)$$

b) Modèle de Batchelor et Green

En 1972, Batchelor et Green ajoutent à la formule d'Einstein un terme quadratique, pour tenir compte du mouvement brownien des particules, la formule Einstein devient :

$$\mu = \mu_s (1 + 2.5 \times \Phi + 6.2 \times \Phi^2) \quad (3)$$

Cette formule valable pour une concentration volumique, $\Phi \leq 30\%$ [6 7].

c) *Modèle de Ball et Richmond*

Pour une suspension concentrée, en 1980 Ball et Richmond modifient le modèle de Batchelor et Green, en faisant intervenir une concentration maximale admissible ($\Phi_m \approx 0.64$ pour des particules solides de forme sphères dans le solvant):

$$\mu = \mu_s \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^{-2.5 \times \Phi_m} \quad (4)$$

Dans cette relation la concentration maximale admissible (Φ_m) représente la compacité maximale en particules. c'est-à-dire le volume maximal de particules par unité de volume total que l'on puisse inclure dans la suspension Cette formule valable pour une concentration volumique, $\Phi \leq 45\%$ [6 7].

d) *Modèle de Phan-Thien et Pham*

Phan-Thien et Pham, en 1987 proposent une expression plus complexe de la viscosité effective des fluides avec des suspensions diluées des particules solides, qui est donnée par la formule suivante :

$$\mu = \mu_s (1 - \Phi)^{-2.5} \quad (5)$$

2.3. Equation Reynolds

L'équation de Reynolds dans le cas d'un palier compliant (figure 1) lubrifié par fluide avec la présence des particules solides dans un solvant newtonien isovisqueux fonctionnant en régime isotherme et permanent est :

$$\frac{\partial}{R \partial \theta} \left[\frac{h^3}{\mu_s G(\Phi)} \frac{\partial p}{R \partial \theta} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{\mu_s G(\Phi)} \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6 \omega \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (6)$$

Où, la fonction $G(\Phi)$ est due la présence des particules solides dans le lubrifiant.

Pour un fluide propre ou fluide sans particules solides (fluide Newtonien) : $G(\Phi) = 1$

Pour un fluide pollué par particules solides (pollution solide) :

- Modèle d'Einstein : $G(\Phi) = (1 + 2.5 \times \Phi)$

- Modèle de Batchelor et Green : $G(\Phi) = (1 + 2.5 \times \Phi + 6.2 \times \Phi^2)$

- Modèle de Ball et Richmond : $G(\Phi) = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^{-2.5 \times \Phi_m}$

- Modèle de Phan-Thien et Pham : $G(\Phi) = (1 - \Phi)^{-2.5}$

Avec, p est la pression hydrodynamique engendrée dans le film lubrifiant.

Dans le cas d'un palier aligné lisse et compliant (déformable) (figure 1), l'équation géométrique qui définit en chaque point l'épaisseur du film lubrifiant est donnée par [8]:

$$h(\theta, p) = C(1 + \varepsilon \cos \theta) + U_r \quad (7)$$

où, U_r est le déplacement radial défini par : $U_r = L_0 \times p$

avec, L_0 est l'opérateur de compliance qui s'exprime comme suit : $L_0 = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \frac{t_h}{E}$

E et ν sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson de la couche élastique mince représentant le revêtement du palier et t_h est l'épaisseur du revêtement de surface du palier.

L'équation de Reynolds (6) est discrétisée par la méthode des différences finies centrées. Le système linéaire des équations obtenu est résolu par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

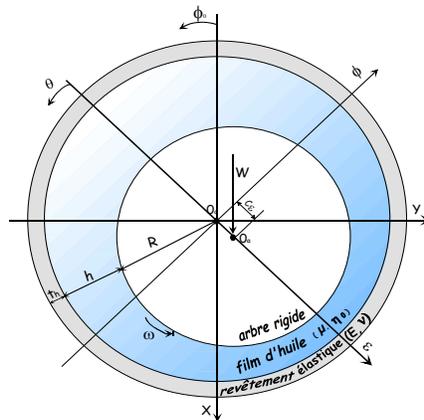


FIGURE 1. Section droite d'un palier compliant

3. RESULTATS

L'étude paramétrique menée dans ce travail permet de mettre en évidence l'influence des effets de concentration volumique des particules solides (pollution solide) dans une base d'huile minimale, par exemples huile lubrifiante pollué ou contaminé par poussières, sable ou des particules solides dues à l'usure des surfaces de contact dans un solvant newtonien sur le champ de pression, la déformée géométrique du revêtement de surface du palier, la force de frottement sur le coussinet et début de fuite volumique moyen d'un palier lisse compliant de longueur finie, dont les caractéristiques géométrique, les conditions de fonctionnement et les propriétés physiques du lubrifiant sont portés dans le tableau 1.

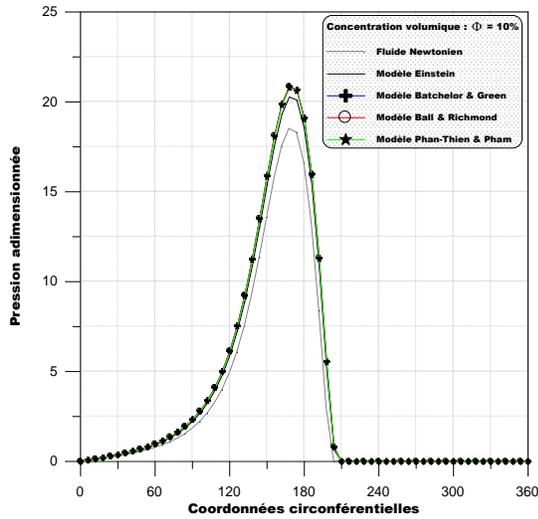
Caractéristiques	valeurs
Diamètre du palier, L	$50 \times 10^{-3} \text{m}$
Rayon de l'arbre, R	$25 \times 10^{-3} \text{m}$
Jeu radial, C	$50 \times 10^{-6} \text{m}$
Vitesse angulaire de l'arbre, ω	300rpm
Viscosité dynamique mesurée à la pression atmosphérique, μ_s	0.03 Pa.s
Masse volumique, ρ	870 kg/m ³

TABLEAU 1. Caractéristiques géométriques et conditions de fonctionnement

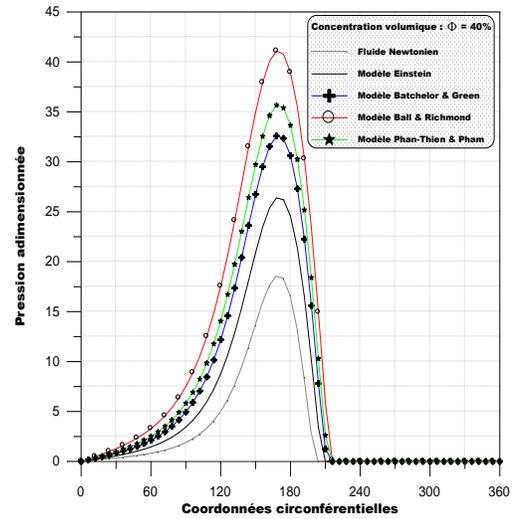
3.1. Effets de concentration volumique de la pollution solide sur le pic de pression dans le film lubrifiant

La figure 2, présente l'influence des effets de concentration volumique de la pollution solide (Φ) dans un solvant de viscosité dynamique μ_s sur le pic de pression statique adimensionnée en 2D dans la section médiane d'un palier compliant, pour une excentricité relative statique imposée, $\varepsilon = 0.90$ et trois valeurs de concentration volumique de la pollution solide : $\Phi = 0$ (fluide sans particules solide ou fluide newtonien), 10 et 40 % [6].

On observe une augmentation significative du pic de pression dans le film lubrifiant avec l'augmentation de concentration volumique de la pollution solide dans l'huile lubrifiante. Cette augmentation du pic de pression est due à l'augmentation de la viscosité effective de mélange (huile lubrifiante + particules solides) [6]. En outre, cette augmentation est d'autant plus importante pour forte concentrations volumiques de la pollution solide dans le solvant ($\Phi = 40\%$) est de l'ordre de 122% par rapport au fluide lubrifiant sans particules solides (figure 2-b) pour le modèle Ball & Richmond qui est le modèle le plus valable et plus recommandé de l'utiliser pour tenir en compte de la présence des fortes concentrations volumiques dans le solvant ($\Phi \leq 45\%$) [6].



a) Concentration volumique : $\Phi = 10\%$

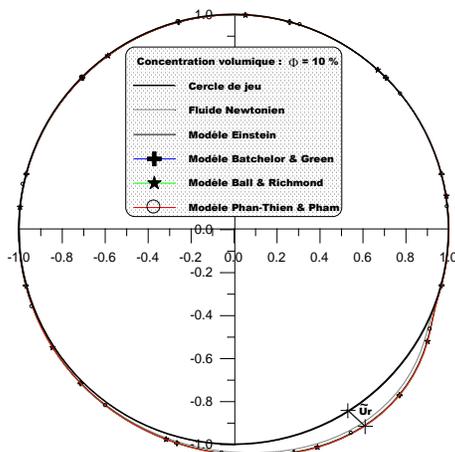


b) Concentration volumique : $\Phi = 40\%$

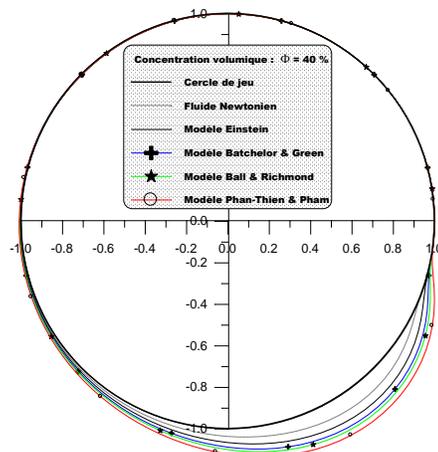
FIGURE 2. Variations circonférentielles de la pression adimensionnée dans la section médiane du palier

3.2. Effets de concentration volumique de la pollution solide sur les déformations élastiques du revêtement

Sur la figure 3, on compare la déformée géométrique (déplacement radial) du revêtement de surface du coussinet de la section médiane du palier pour une épaisseur du revêtement de surface du palier, $t_h = 0.5\text{mm}$ et d'un matériau compressibles ($E = 3\text{GPa}$, $\nu = 0.36$) correspondant aux caractéristiques élastiques de polyamide (PA). On observe une augmentation remarquable de la déformée de surface du revêtement du palier avec l'augmentation de la concentration volumique des particules rigides dans le fluide lubrifiant. Cette déformée devient plus importante avec forte concentration volumique de la pollution solide ($\Phi = 40\%$) (figure 3-b). Notant que la déformée géométrique de surface du revêtement du palier est due à l'augmentation importante du pic de pression dans le film (figure 2-b). Il est intéressant de noter aussi, que cette déformée permet de modifier la géométrie du palier et augmenter le jeu de fonctionnement.



a) Concentration volumique : $\Phi = 10\%$



b) Concentration volumique : $\Phi = 40\%$

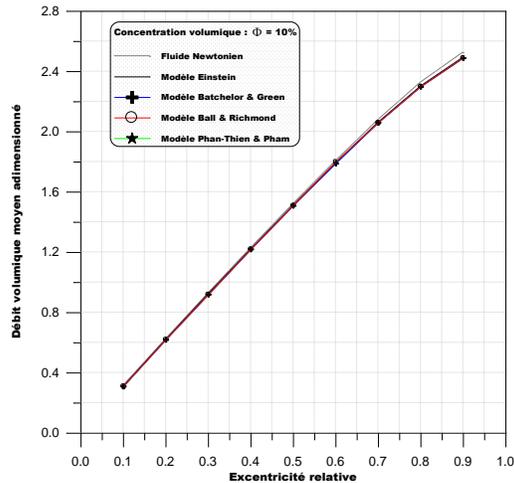
FIGURE 3. Déformée géométrique du revêtement de surface du coussinet dans la section médiane du palier

3.3. Effets de concentration volumique de la pollution solide sur les performances statiques du palier

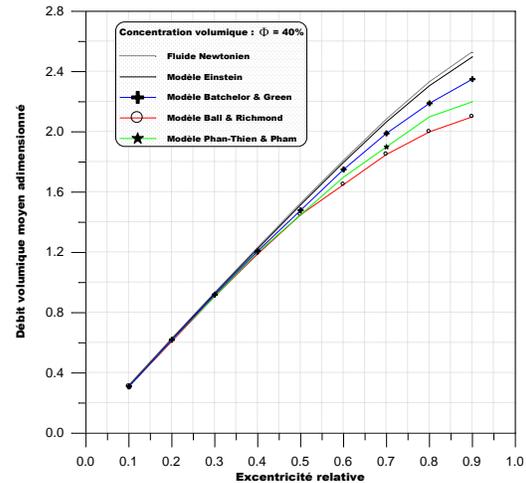
Les performances statiques ont été obtenues pour une excentricité relative statique variant de 0.01 à 0.90 et trois valeurs de concentration volumique : $\Phi = 0$ (fluide newtonien ou fluide propre), 10, et 40 % [6].

La figure 4 présente les variations de débit volumique moyen adimensionné d'écoulement du palier en fonction de l'excentricité relative statique pour différentes valeurs de concentration volumique proposées.

Le débit de fuite moyen volumique diminue avec l'augmentation de la concentration volumique de la pollution solide pour les grandes valeurs de l'excentricité relative statique (palier lourdement chargé) surtout pour les deux modèles rhéologiques de Ball & Richmond et Phan-Thien et Tham les plus recommandés à forte concentration volumique. Notant que cette diminution significative est due à l'augmentation de la viscosité effective de l'huile lubrifiante qui augmente la résistance du lubrifiant à l'écoulement [6].



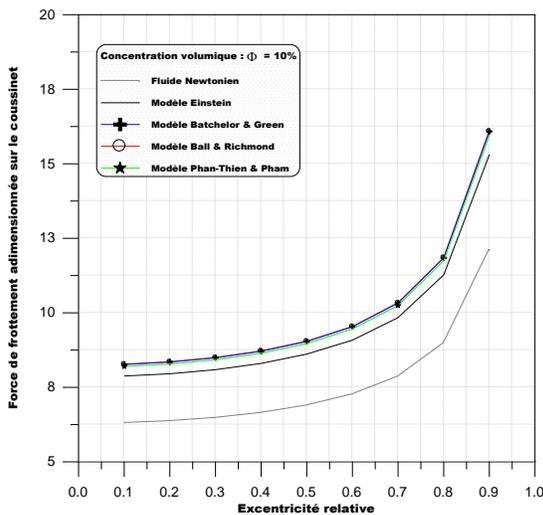
a) Concentration volumique : $\Phi = 10\%$



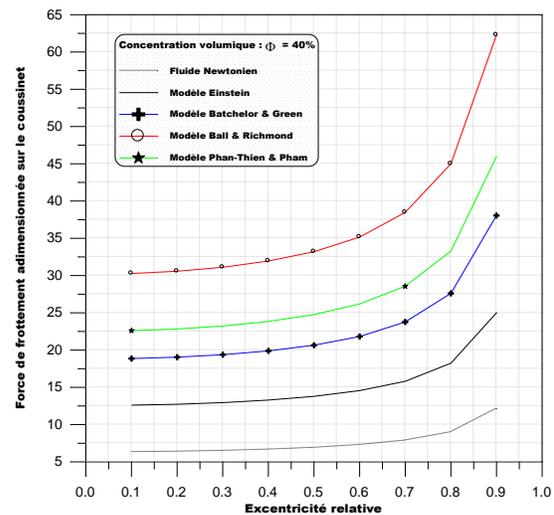
b) Concentration volumique : $\Phi = 40\%$

FIGURE 4. Variations du débit de fuite moyen volumique en fonction de l'excentricité relative statique

Les variations de force de frottement adimensionnée de l'huile lubrifiante sur le coussinet du palier en fonction de l'excentricité relative statique pour trois valeurs de concentration volumique de la pollution solide, est présentée sur la figure 5. Comme montre la figure, l'effet de la concentration volumique de la pollution solide dans le solvant conduit à une augmentation importante de la force du frottement de l'huile lubrifiante. Cette augmentation significative devient plus importante avec forte concentration volumique ($\Phi = 40\%$) (figure 5-b) pour des grandes valeurs de l'excentricité relative statique. On peut conclure que la présence de la pollution solide dans les huiles lubrifiantes conduit d'augmenter les pertes d'énergie par frottement dans le film.



a) Concentration volumique : $\Phi = 10\%$



b) Concentration volumique : $\Phi = 40\%$

FIGURE 5. Variations de la force de frottement sur le coussinet du palier en fonction de l'excentricité relative

4. CONCLUSIONS

Le présent travail s'intéresse à l'étude théorique et numérique des effets de la pollution solide des huiles lubrifiantes sur les performances statiques des paliers hydrodynamiques : Effets de concentration volumique. Le problème d'interaction fluide-structure est résolu numériquement par des processus itératifs. L'étude paramétrique réalisée, dans ce travail présente une étape vers une meilleure connaissance théorique et numérique de l'influence des effets de concentration volumique de la pollution solide dans une base d'huile minimale sur les performances statiques des palier fluides fonctionnant en régime hydrodynamique. Cette étude paramétrique a montré en évidence la présence des particules solides (pollution solide) dans une huile lubrifiante conduit d'augmenter sensiblement : les pertes d'énergie par frottement dans le film lubrifiant, la déformée géométrique de surface du revêtement du palier et le pic de pression dans le palier pour des fortes concentrations volumiques et surtout dans le cas où le palier est fortement chargé.

REFERENCES

- [1] D. Nicolas, Etude du Glissement dans les roulements à billes grandes vitesses, Le turbomachine- influence de la pollution du lubrifiant, Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National des sciences appliquées de Lyon, 1989.
- [2] F. Ville, pollution solide des lubrifiants, indentation et fatigue des surfaces, Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National des sciences appliquées de Lyon, 1998.
- [3] S. A. McKee, Effect of abrasive in lubricant, *SAE Trans.*, 22, 73-77, 1927.
- [4] N.s. Nicola, Les paliers hydrodynamiques soumis à un torseur de forces quelconque, Thèse de Docteur Ingénieur, Lyon, 1972.
- [5] I. Tanner Roger, Engineering Rheology, *Oxford Engineering Science Series*, 2nd Edition, 2000.
- [6] D.G. Thomas, Transport characteristics of suspension: a note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles, *J. Colloid Sci.*, (20) :267-277, 1965.
- [7] L. T. kein, Approche par changement d'échelle des caractéristiques rhéologiques d'une suspension de particules dans un fluide à seuil, Thèse de Docteur, l'école nationale des ponts et chaussées, 2009
- [8] H. Boucherit, M. Lahmar, B. Bou-Saïd, Misalignment effects on steady-state and dynamic behaviour of compliant journal bearings lubricated with couple stress fluids, *Journal of Lubrication Science*, John Wiley Editor, pp. 241-268, 2008.