

Influence des surfaces texturées sur les performances hydrodynamiques d'un blochet

Mihai B. Dobrica*, Michel Fillon*, Mircea D. Pascovici** & Traian Cicone**

*Université de Poitiers, Laboratoire de Mécanique des Solides, UMR CNRS 6610, SP2MI, Bd Pierre et Marie Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France
dobrica@lms.univ-poitiers.fr

**Université « Politehnica » de Bucarest, Dépt. D'Eléments de Machines et Tribologie, Roumanie

Résumé :

L'utilisation des surfaces micro-texturées dans les paliers et butées hydrodynamiques peut avoir des effets positifs sur les performances de ces composants. Cependant, une étude analytique suffit pour montrer qu'une mauvaise distribution ou un dimensionnement inadapté des textures peuvent conduire à des pertes de performance et non à des gains. Afin de mieux comprendre le comportement de ces surfaces, un modèle numérique a été mis au point et appliqué à un blochet hydrodynamique ayant des surfaces micro-texturées. Une analyse paramétrique a été menée afin de déterminer les paramètres optimaux de texturation, tel que la distribution, la densité et la profondeur des alvéoles. L'influence de la texturation en fonction de l'inclinaison du blochet est également discutée. Les performances du blochet texturé sont analysées en termes de capacité de charge et forces de frottement par rapport au cas lisse.

Abstract:

Replacing smooth hydrodynamic bearing surfaces by dimpled surfaces may have positive effects on the performance of these components. However, simple analytical studies can show that inadequate dimensions or distribution of the dimples may lead to performance losses instead of gains. In order to better assess the behaviour of these surfaces, a numerical model has been developed and employed in the study of a hydrodynamic plane-inclined bearing having dimpled surfaces. A parametric analysis has been conducted in order to determine optimal texturing parameters such as dimple distribution, density and depth. Texturing effects have also been studied in function of pad angle. Bearing performance is assessed in terms of load capacity and friction force, for both dimpled and smooth surfaces.

Mots-clefs : lubrification hydrodynamique; surfaces texturées; modélisation numérique.

1 Introduction

Les surfaces texturées (par gravure laser ou par lithographie) sont le plus souvent rencontrées dans les garnitures mécaniques, où elles contribuent à l'amélioration du comportement dynamique de ces dispositifs (Etsion (2002)). Plus récemment, les chercheurs ont montré que la texturation des segments ou des chemises des pistons dans les moteurs à combustion interne peut conduire à des importantes réductions du frottement dans ces contacts (Ronen *et al.* (2001)). Quant aux butées hydrodynamiques, la texturation a suscité l'intérêt surtout par les effets de portance observés dans les butées à faces parallèles (Brizmer *et al.* (2003)). Ces effets de portance, présents même en absence des textures (et dus à la rugosité des surfaces), peuvent être significativement amplifiées par la texturation partielle du grain fixe (Tonder *et al.* (2004), Etsion *et al.* (2004)).

Le travail présenté par la suite s'intéresse aux éventuels effets bénéfiques de la texturation lorsque celle-ci est appliquée sur la surface active d'un patin, dans une configuration blochet hydrodynamique à patin incliné. On prouvera que la texture peut avoir des effets positifs et négatifs à la fois, et que son influence reste fortement dépendante des différents paramètres de texturation et de fonctionnement. Une étude paramétrique est ainsi menée à la recherche d'une texture optimale permettant, soit de maximiser la capacité de charge, soit de réduire au minimum les forces de frottement.

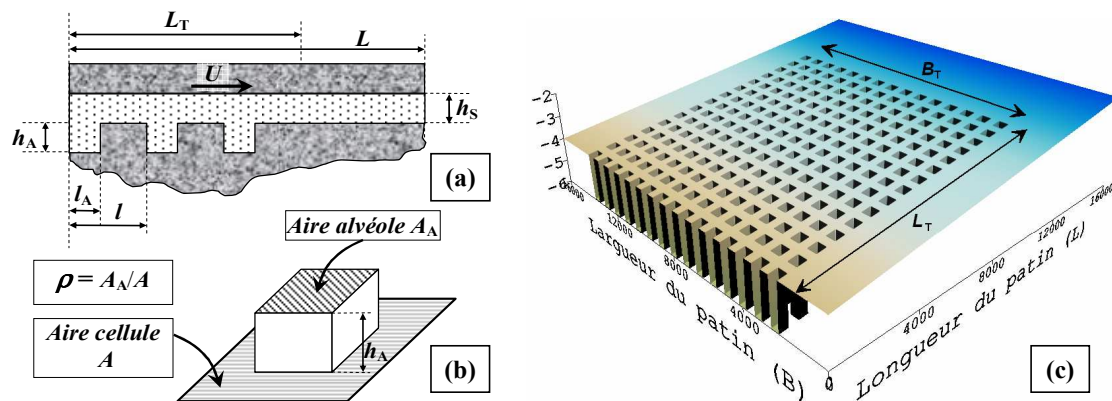


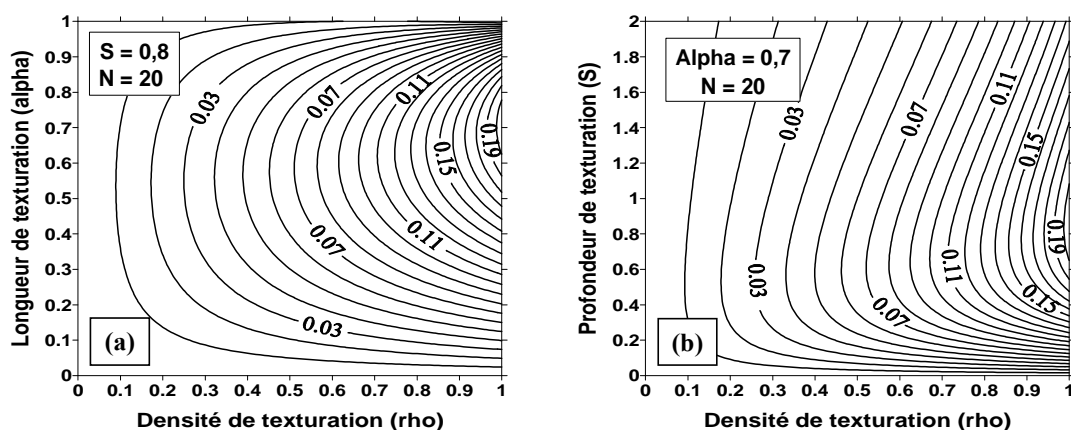
FIG. 1 – Schéma des cellules (1D et 2D) et surface texturée du patin incliné (2D).

2 Modèle analytique, modèle numérique, validation

Dans le cas d'un blochet à faces parallèles, de largeur infinie et dont les textures ont, elles aussi, une largeur infinie (Fig. 1), une solution analytique existe. Pour cette configuration, la capacité de charge et la force de frottement sur la paroi mobile sont données par :

$$\bar{W} = \frac{3\alpha\rho S[N(1-\alpha) + \alpha(1-\rho)]}{N[(1+S)^3(1-\alpha\rho) + \alpha\rho]} \quad \bar{F}_f = \frac{\alpha\rho}{(1+S)} + (1-\alpha\rho) + \frac{3\alpha\rho S^2(1-\alpha\rho)}{(1+S)^3(1-\alpha\rho) + \alpha\rho}$$

Les paramètres qui interviennent dans ces relations sont : le rapport entre la longueur de la zone texturée et la longueur du patin $\alpha=L_T/L$, la densité de texturation $\rho=l_A/l$, la profondeur des alvéoles adimensionnée par la hauteur du film à la sortie $S=h_A/h_s$, et le nombre de cellules N (qui n'influence que la capacité de charge). L'étude de l'influence de ces paramètres sur la capacité de charge donne une première idée sur leurs valeurs optimales (Fig. 2). Ainsi, un maximum de capacité portante est obtenu pour une configuration de type patin échelon ($\rho=1$), dont la profondeur adimensionnée de l'alvéole est $S=0,866$. On constate que la profondeur optimale varie en fonction de la densité de texturation, entre 0,5 et 0,866, alors que la longueur de texturation optimale α varie de 0,55 à 0,70. Le nombre de cellules (non illustré ici) joue peu sur les performances du patin lorsqu'il est suffisamment grand (supérieur à 10).

FIG. 2 – Influence sur \bar{W} de la densité, de la longueur et de la profondeur de texturation (1D).

Le modèle numérique utilisé pour l'analyse tridimensionnelle d'un blochet à patin incliné et texturé est basé sur l'équation de Reynolds. Cette équation n'est pas tout à fait adaptée à

l'étude des géométries discontinues, et des pertes de précision peuvent être engendrées lors du passage des discontinuités dans l'épaisseur du film. Une possibilité de minimiser ces erreurs est d'utiliser un maillage variable, très fin dans les zones de discontinuité. Cette approche est cependant difficile à mettre en œuvre dans le cas des surfaces texturées, où le nombre de discontinuités est très important. Dans cette étude, le choix d'un maillage fin mais non variable a été fait. Les éventuelles imprécisions du modèle ont été évaluées par rapport à la solution analytique (cas 1D, patin à surfaces parallèles) et par rapport à une solution CFD basée sur les équations de Navier-Stokes, et obtenue avec le code commercial Fluent (cas 2D, patin à surfaces parallèles de largeur infinie). Les résultats de ces tests de maillage/précision sont présentés sur la figure 3. Dans le cas d'une étude unidimensionnelle, les résultats numériques sont très proches de ceux obtenus par voie analytique, avec des écarts inférieurs à 0,25% pour tous les maillages considérés. Tel n'est pas le cas en 2D, où le maillage choisi pour l'étude paramétrique ci-dessous présente des erreurs évaluées à 1,4%. L'utilisation d'un maillage plus fin aurait éliminé ces erreurs au détriment du temps de calcul. Quand la solution numérique est comparée aux résultats obtenus avec Fluent, un écart d'approximativement 2,6% est obtenu, après avoir éliminé les erreurs dues au maillage dans le modèle de Reynolds. Cet écart peut être justifié, en partie, par le maillage utilisé avec Fluent (40x40x20 nœuds/cellule, 1 million nœuds au total).

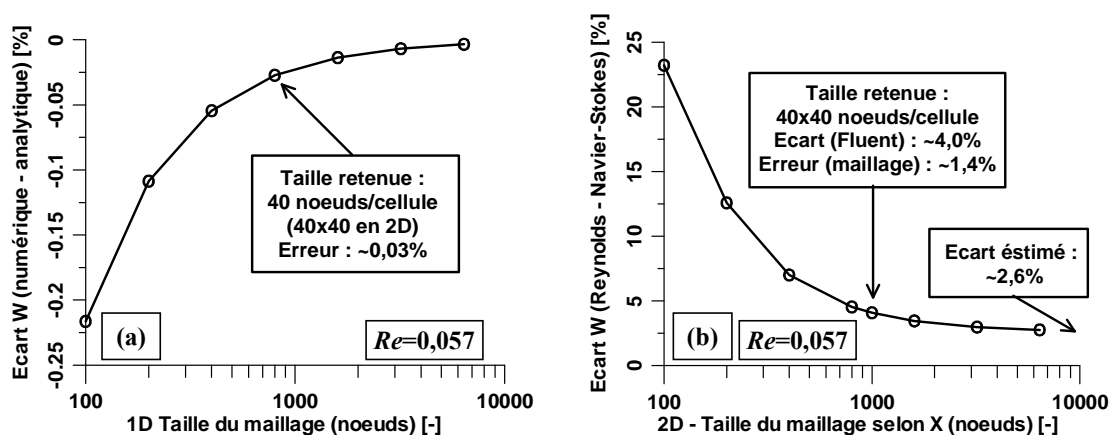


FIG. 3 – Convergence du maillage et des écarts par rapport aux solutions analytique/Fluent.

3 Etude paramétrique

L'étude paramétrique présentée par la suite a été menée afin de déterminer la configuration optimale de texturation. Lors de cette étude, quelques paramètres ont été maintenus constants afin de limiter le nombre de cas possibles. Ainsi, les cellules élémentaires de texturation et les alvéoles ont une forme carrée. Les caractéristiques géométriques et de fonctionnement du blochet ont été, elles aussi, maintenues constantes (blochet carré, patin incliné ayant un rapport entre les épaisseurs à l'entrée et à la sortie $H=h_E/h_S$ égal à 2). Les paramètres variables lors de cette étude sont : la longueur et la largeur de la zone texturée (L_T , B_T), la profondeur des alvéoles ($S=h_A/h_S$) et la densité de texturation ($\rho=A_A/A$). Les résultats sont normalisés par rapport au cas lisse (surfaces non texturées). Pour le cas où le nombre de Reynolds (basé sur l'épaisseur minimale du film) n'est pas indiqué sur les figures, il est égal à $Re=0,158$.

Répartition de la texture. Une première analyse permet de définir la zone optimale à texturer. Ainsi, une zone rectangulaire, de longueur L_T et largeur B_T variables, est considérée sur la surface du patin, centrée selon la largeur et placée à l'entrée du patin. Sur cette zone, une texture de profondeur $S=0,866$ (optimale dans le cas du patin Rayleigh), ayant une densité de texturation $\rho=22,5\%$ et $\rho=60\%$, est appliquée. La figure 4 donne la variation de la capacité de

charge du patin, pour les deux densités considérées, en fonction de la longueur et de la largeur de texturation. On constate que la largeur optimale de texturation ne dépend pas de sa densité et se situe autour de 65% de la largeur du patin. Quant à la longueur optimale, celle-ci varie très peu avec la densité de texturation, ayant une valeur égale à 70% - 75% de la longueur du patin à une densité de 22.5% et 60%, respectivement. Une étude paramétrique similaire a été conduite afin d'obtenir la répartition de la texture qui permet de minimiser la force de frottement sur le paroi mobile. Cette fois-ci, la capacité portante a été gardée constante et l'épaisseur du film a été obtenue au cours du processus itératif afin de converger à une pression spécifique de 1MPa. La profondeur de la texture a été elle aussi modifiée au cours des itérations afin de garder un rapport constant $S=0,866$. Les résultats, présentés sur la figure 5, montrent que la taille de texture optimale, permettant de minimiser le frottement, se situe autour de 75% de la largeur et 80-85% de la longueur du patin. Donc, une répartition plus élargie de la texture sur la surface du patin (couvrant ~60% de sa surface) se montre optimale lorsqu'on recherche la minimisation du frottement, tant que la maximisation de la capacité de charge est obtenue pour une zone texturée moins élargie (~45% de la surface). On constate aussi que la texturation de la surface entière du patin a des effets négatifs à la fois sur la capacité portante et sur la force de frottement, et que, en général, la texture ne devrait pas couvrir plus de 70% de la surface du patin.

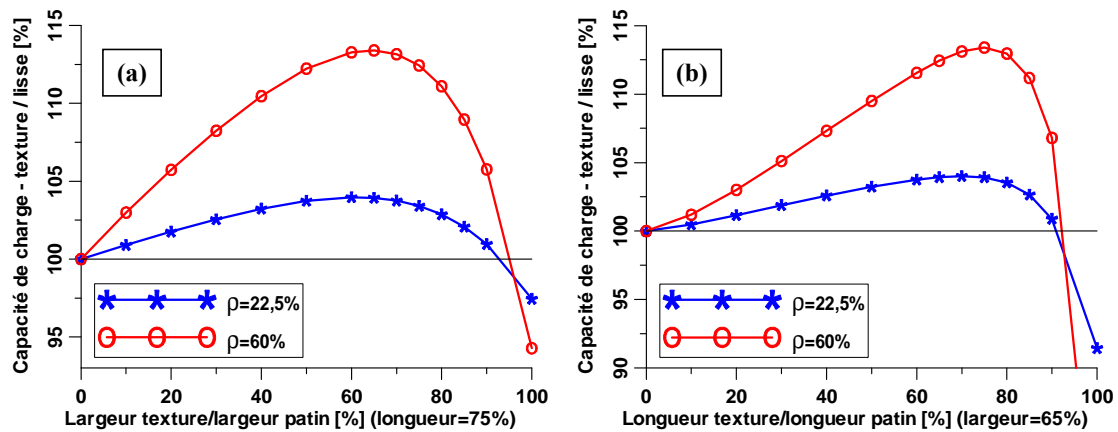


FIG. 4 – Influence de la taille de la zone texturée sur la capacité de charge.

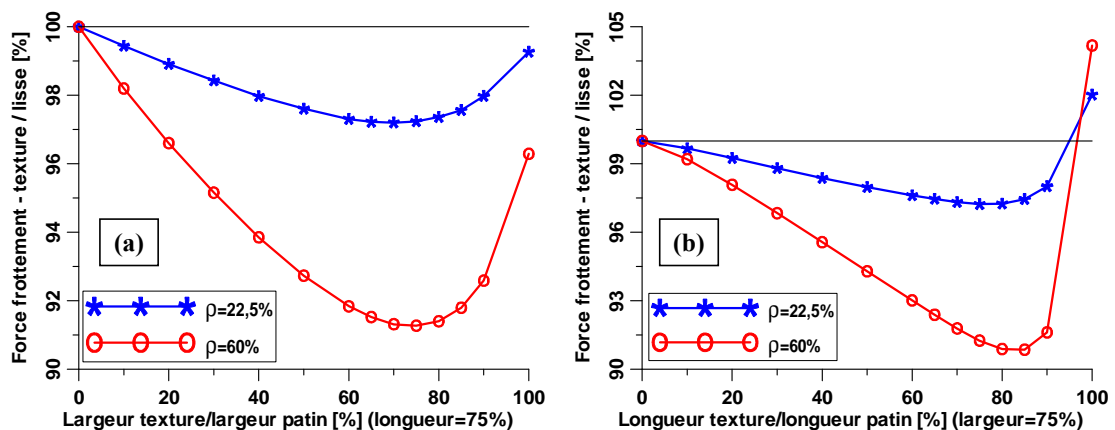


FIG. 5 – Influence de la taille de la zone texturée sur la force de frottement.

Profondeur de texturation. Une fois la zone de texturation optimale déterminée, l'influence de la profondeur de la texture est étudiée. Deux densités de texturation sont considérées ($\rho=22,5\%$ et $\rho=60\%$) pour une profondeur de la texture qui varie de $S=0$ (surface lisse) à $S=2$. De nouveau,

la valeur permettant la maximisation de la force portante est étudiée pour une géométrie imposée (hauteur du film à l'entrée et à la sortie), alors que la minimisation de la force de frottement est analysée pour une pression spécifique imposée de 1MPa. Nous constatons une dépendance notable des profondeurs optimales avec la densité de texturation (Fig. 6). Ainsi, que l'objectif soit la minimisation du frottement ou la maximisation de la portance, les profondeurs optimales de la texture sont approximativement $h_A=0,6h_S$ pour une densité $\rho=22,5\%$, et $h_A=0,8h_S$ pour une densité $\rho=60\%$. Pour le cas limite du patin incliné à poche (densité $\rho=100\%$), une profondeur de $h_A=0,85h_S$ permet de maximiser la portance, alors que le frottement est optimisé pour $h_A=1,10h_S$. La valeur retenue pour les analyses suivantes sera $S=h_A/h_S=0,8$.

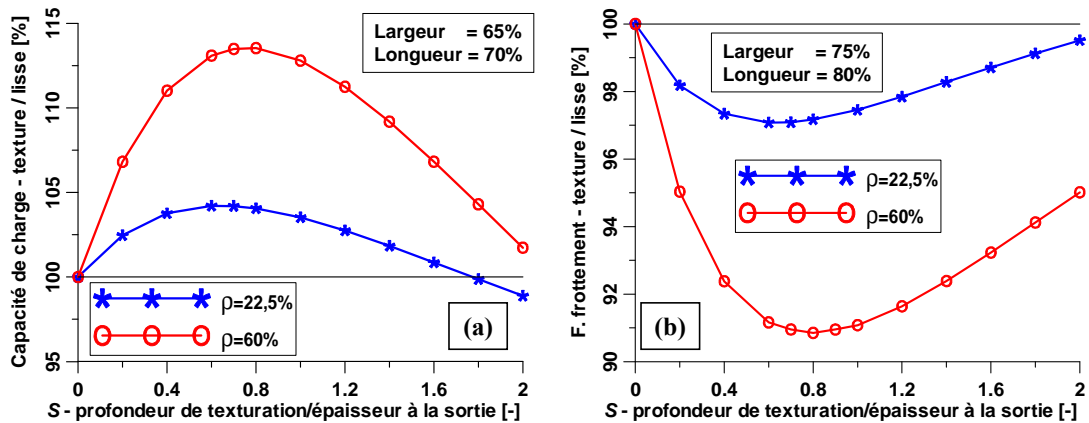


FIG. 6 – Influence de la profondeur de texturation sur la capacité de charge et sur le frottement.

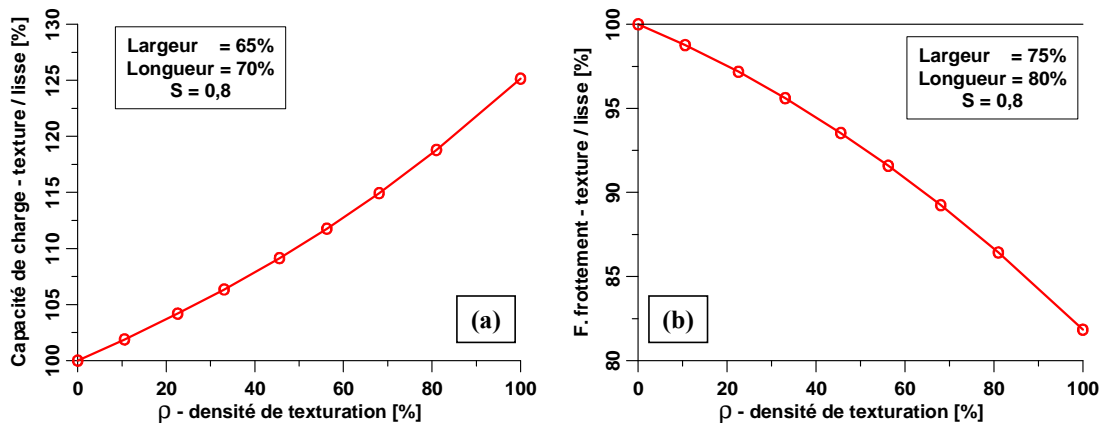


FIG. 7 – Influence de la densité de texturation sur la capacité de charge et sur le frottement.

Densité de texturation. Dans cette analyse, la distribution de la texture sur la surface du patin et sa profondeur gardent leurs valeurs optimales déterminées précédemment, et seule la densité de texturation varie entre 0% (surface lisse) et 100% (patin incliné à poche). Les résultats, en bon accord avec ceux obtenus pour le blochet 1D à faces parallèles, montrent que la densité optimale de texturation est de 100%. Cela revient à dire que la texture optimale est « une poche ». Ce résultat n'a pas encore été montré dans la littérature, mais Etsion *et al.* (2003) ont précisé que plus on augmente la densité de texturation, plus on gagne en capacité de charge. Mais, face aux gains de performance supérieurs obtenus par l'utilisation d'une poche, la texturation, plus coûteuse, a du mal à justifier son application dans les butées hydrodynamiques à patin incliné. En faisant abstraction de ce résultat qui réduit considérablement l'intérêt de la texturation partielle, on peut remarquer que celle-ci permet d'augmenter la capacité de charge du blochet de jusqu'à 26% ou de diminuer le frottement sur le parois mobile de maximum 18%.

Comportement en configuration non optimale. L'étude paramétrique précédant a permis d'identifier la configuration de texturation qui maximise les performances d'un blochet à patin incliné lorsqu'il fonctionne à un rapport entre les épaisseurs du film à l'entrée et à la sortie égal à deux ($H=h_E/h_S=2$), proche de la valeur idéale ($H=2,2$). Cependant, il arrive souvent que les butées hydrodynamiques doivent fonctionner à de plus fortes ou plus faibles charges, cas où le rapport H peut s'éloigner de sa valeur idéale. Par la suite, on s'intéresse aux effets apportés par la texture du patin, lorsque le blochet fonctionne dans de telles conditions (le rapport H varie de 1 à 5). Afin de rester dans le cas de la texture partielle, et non dans celui de la poche, une densité non optimale de texturation a été utilisée ($\rho=60\%$). Les résultats (Fig. 8), montrent la forte influence des conditions de fonctionnement sur les effets de la texturation. Ainsi, à de faibles charges, lorsque l'épaisseur du film est grande par rapport à la profondeur des alvéoles, la texture garde ou amplifie même ses effets positifs. Tel n'est pas le cas à de fortes charges, quand la profondeur d'alvéoles devient trop grande par rapport de l'épaisseur du film. Dans ce cas, la texturation conduit à des pertes de performance par rapport aux surfaces lisses.

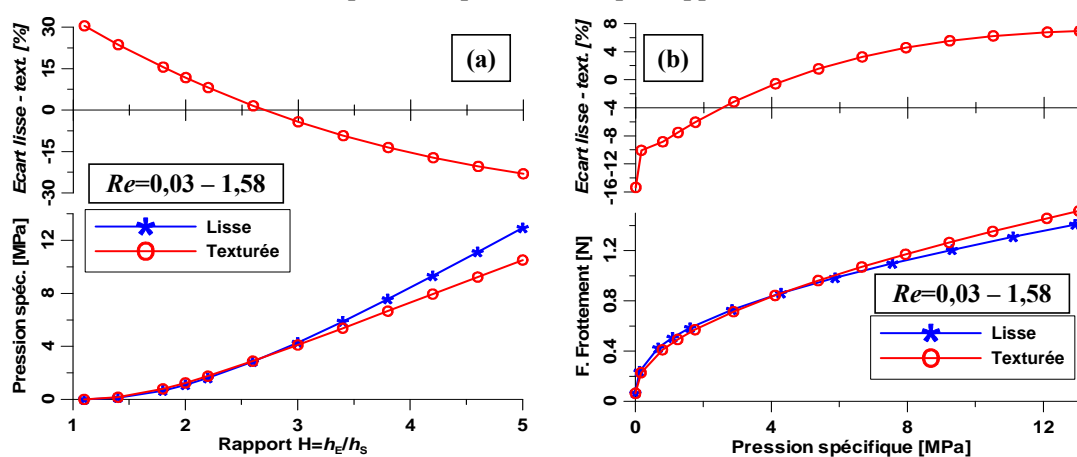


FIG. 8 – Influence de l'épaisseur du film sur la capacité de charge et sur le frottement.

4 Conclusions

Cette étude a permis d'identifier une configuration optimale de texturation, permettant de maximiser la portance (ou minimiser le frottement) dans une butée hydrodynamique. Malheureusement, nous avons pu constater que la texturation avait des effets moins prononcés que les poches, lesquelles présentent un moindre coût de fabrication ainsi que de meilleures performances. Qu'il s'agisse de texturation partielle ou totale (poche), celle-ci reste fortement dépendante des conditions de fonctionnement. En général, la texture a des effets positifs. A l'inverse, lorsque l'épaisseur du film devient trop faible par rapport à la profondeur des alvéoles, ou, lorsque la texture est appliquée sur la surface entière du patin, ces effets sont négatifs.

Références

- Etsion, I. 2002 A laser surface textured hydrostatic mechanical seal. *Trib. Trans.* **45**, 430-434
- Ryk, G., Klingerman, Y., Etsion, I. 2002 Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components. *Trib. Trans.* **45**, 444-449
- Brizmer, V., Klingerman, Y., Etsion, I. 2003 A laser surface textured parallel thrust bearing. *Trib. Trans.* **46**, 397-403
- Tonder, K. 2004 Hydrodynamic effects of tailored inlet roughnesses: extended theory. - *Trib. Int.* **37**, 137-142
- Etsion, I., Halperin, G., Brizmer, V., Klingerman, Y. 2002 Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings. *Trib. Letters.* **17**, 295-300