

Conception d'un palier fluide par une approche mécano-fiabiliste

DIOP, Khadim

Mél: khadim.diop@univ-angers.fr

Résumé : Cet article présente une méthodologie pour l'évaluation de la probabilité de défaillance d'un palier de butée fluide. Ce type d'organe joue un rôle important dans la stabilité des rotors des machines, des systèmes mécatroniques et en métrologie de haute précision. Dans cet article, les caractéristiques d'une butée à géométrie simple sont calculées analytiquement afin de montrer d'une manière pratique l'intérêt de la nouvelle méthodologie proposée pour la conception d'un palier. L'approche repose sur un couplage mécano-fluido-fiabiliste. Les méthodes de simulation Monte Carlo et FORM (First Order Reliability Method) sont utilisées pour l'évaluation de la probabilité de défaillance.

Mots-Clés: Palier de butée, Fluide, Fiabilité, Monte Carlo, FORM

Collaboration de recherche : Laboratoire En Sureté De Fonctionnement, Qualité Et Organisation.

1 Introduction

Les paliers fluides de butée sont des organes de machines utilisés en construction mécanique pour sustenter et guider, en rotation, des arbres de transmission. Ils sont aujourd'hui très utilisés pour les machines tournantes comme les compresseurs et les turbines, etc.

2 Modélisation d'un palier de butée

2.1 Equation de Reynolds

Les développements qui mènent aux choix des hypothèses simplificatrices de l'étude sont énoncées en détail par [1].

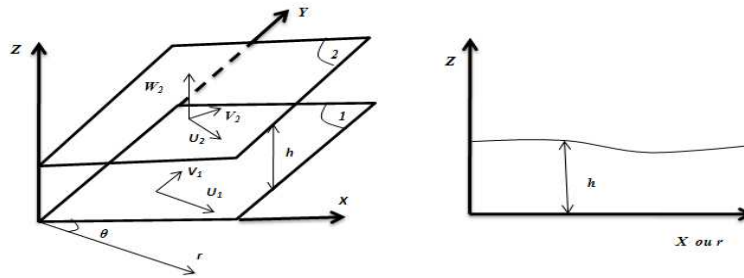


Fig. 1 Systèmes d'axes et notations

L'équation de Reynolds s'écrit donc :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho r h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \\ = 6r\rho(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial r} + 6\rho(V_1 - V_2) \frac{\partial h}{\partial \theta} + 6rh \frac{\partial}{\partial r} [\rho(U_1 + U_2)] + 6h \frac{\partial}{\partial \theta} [\rho(V_1 + V_2)] \\ + 6\rho h(U_1 + U_2) + 12\rho r W_2 + 12rh \frac{\partial \rho}{\partial t} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 Application dans le cas d'un palier de butée circulaire

L'équation de Reynolds simplifiée devient alors:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\rho r h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \right] = 0 \quad (8)$$

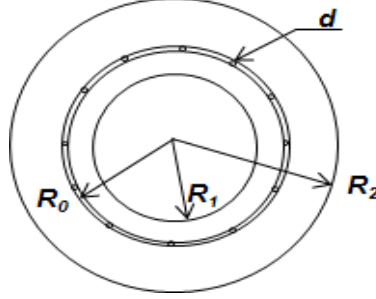


Fig. 2 Schéma du palier de butée étudié

Notations :

P_0 : pression spécifique d'alimentation des orifices (Pa),

P_a : pression atmosphérique (Pa),

R_1 : rayon intérieur (m),

R_0 : rayon de la couronne des orifices (m),

R_2 : rayon extérieur (m),

r : rayon élémentaire (m)

ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3)

μ : viscosité dynamique (Pa/s),

ν : viscosité cinématique

h : épaisseur du film fluide entre la face supérieure et la face inférieure (m).

2.3 Caractéristiques de la butée

L'intégration de la pression sur la surface donne l'expression de la portance qui s'écrit sous la forme:

$$W = \pi P_a (R_2^2 - R_1^2) + \frac{\pi (P_0 - P_a)}{2} \left(\frac{R_1^2 - R_0^2}{\ln \left(\frac{R_0}{R_1} \right)} - \frac{R_2^2 - R_0^2}{\ln \left(\frac{R_0}{R_2} \right)} \right) \quad (11)$$

3 Théorie de la fiabilité

3.1 Principe

La fiabilité est une caractéristique d'un dispositif exprimé par la probabilité qu'il accomplisse une fonction dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné [3]. Elle peut être déduite de l'estimation de la probabilité de défaillance P_f .

$P_f = \int_{G(X_i) \leq 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) dx_1 dx_2, \dots, dx_n = \text{Prob}\{G(X_i) \leq 0\}$ où $G(X_i)$ est la fonction de performance.

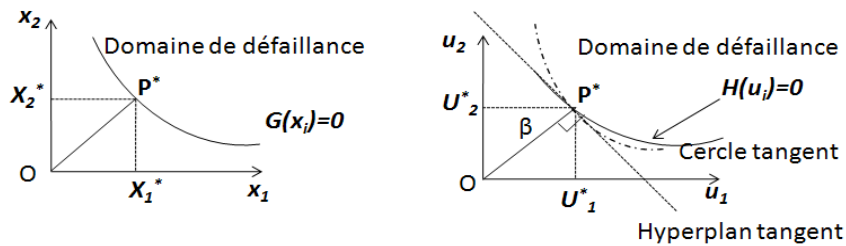


Fig. 3: Passage de l'espace physique à l'espace normé

3.2 Fonction de performance d'un palier fluide

On définit la fonction de performance par la relation :

$$G(X) = W_e - W_{e-max} \quad (15)$$

Où W_{e-max} la portance maximale que peut supporter le palier, et W_e est la portance opérationnelle.

3.3 Méthode de Monte-Carlo

La probabilité de défaillance peut être exprimée par la relation:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[G(X_i) \leq 0]$$

Avec X_i la réalisation du ième tirage, et la fonction indicatrice I vaut 1 si la condition $G(X_i) \leq 0$ est vérifiée et 0 sinon.

3.4 Méthode FORM

La probabilité de défaillance est simplement approchée par:

$$P_f = \varphi(-\beta)$$

L'indice de fiabilité β est alors déterminé par :

$$\beta = \frac{H(\mathbf{U}^*) - \nabla H(\mathbf{U}^*) \mathbf{U}^*}{\|\nabla H(\mathbf{U}^*)\|}$$

4 Application

Les paramètres de la butée pour les calculs sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Valeur des paramètres de butée.

Désignation	R_1	R_0	R_1	ρ	P_s	P_a	d	C_d	μ	n
Valeur	30	48	75	794,7	510^5	10^5	0,15	0,7	0,0012	12

Les rayons et le diamètre d sont exprimés en mm, la masse volumique en kg/m^3 , les pressions en Pascals, la viscosité dynamique en Pa.s.

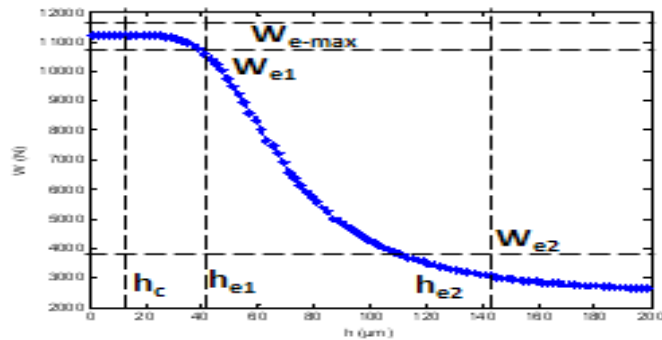


Fig.4-Evolution de la portance en fonction de l'épaisseur du fluide

Le tableau 3 montre les résultats obtenus avec les méthodes de Monte Carlo et FORM pour deux portances nominales $W_{e1} = 1.0572\text{E}+04$ N et $W_{e2} = 3.1777\text{E}+03$ N correspondant respectivement à deux épaisseurs de fonctionnement $h_{e1} = 40 \mu\text{m}$ et $h_{e2} = 140 \mu\text{m}$. L'estimation de P_f pour les deux portances de fonctionnement W_{e1} et W_{e2} a été faite pour $W_{e-max} = 1.1236 \text{E}+04$ N.

Tableau 3. Probabilité de défaillance pour FORM et Monte Carlo.

Méthode	FORM ($h_{e1}=40\text{ }\mu\text{m}$)	FORM ($h_{e2} =$ $140\text{ }\mu\text{m}$)	Monte Carlo ($h_{e1}=40\text{ }\mu\text{m}$)	Monte Carlo ($h_{e2}=140\text{ }\mu\text{m}$)
Temps	15,5	182	495,59	34493
Probabilité	0,06120	0,00251	0,05356	0,00124

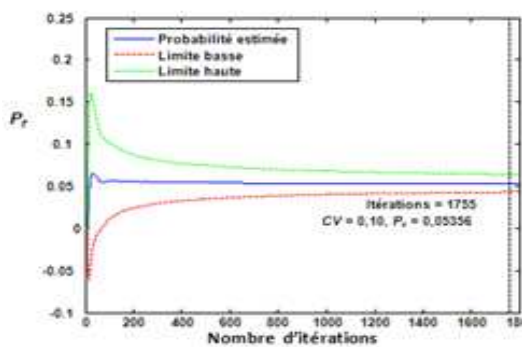


Fig. 5 Probabilité de défaillance pour h_{e1} .

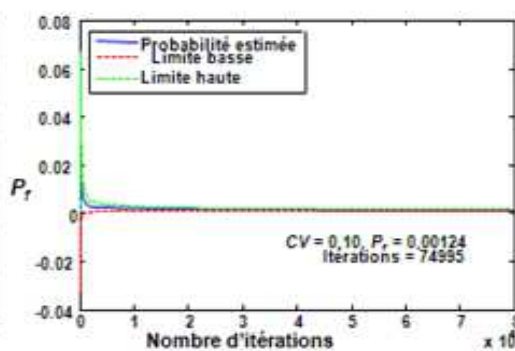


Fig. 6- Probabilité de défaillance pour h_{e2}

On constate que le calcul est très long en utilisant la méthode Monte Carlo surtout pour des probabilités de défaillance très petites comme le montre le tableau 3. FORM reste donc intéressant pour l'estimation de la probabilité de défaillance d'un palier.

6 Conclusion

Pour le calcul de la probabilité de défaillance du palier, on suppose deux portances de fonctionnement dont l'une est proche de la portance critique correspondant à une épaisseur minimale en dessous de laquelle le palier ne peut plus fonctionner, et l'autre éloignée de cette portance critique. La probabilité de défaillance augmente lorsque la hauteur du film fluide diminue.

Références bibliographiques

- [1] Frêne J., Nicolas D., Degueurce B., Berthe D. and Godet M. (1990), Lubrification Hydrodynamique, Paliers et Butées. Edition Eyrolles.
- [2] Anton Van beek. Advanced engineering design : lifetime performance and reliability. Maurice Lemaire en collaboration avec AlaaChateauneuf et Jean-Claude Mitteau (2005)
- [3] Fiabilité des structures(couplage mécano-fiabiliste statique). Lavoisier. F. Guerin, M. Barreau, A. Charki and A. Todoskoff (2006), Bayesian Estimation of Failure probability in Mechanical System Using Monte Carlo Simulation. QTQM.
- [3] AbderafiCharki, David Bigaud, Fabrice Guerin (2013), Behavior Analysis of Machines and System Air, Hemispherical Sprindles using Finite Element Modelling, Industrial Lubrication and Tribology, Vol.5.