



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/10245>

#### **To cite this version :**

Khadim DIOP, Abdérafi CHARKI, Stephane CHAMPMARTIN, Abdelhak AMBARI - Conception D'un Palier Fluide Par Une Approche Mécano-Fiabiliste - In: 21ème Congrès Français de Mécanique, France, 2013-08-26 - 21ème Congrès Français de Mécanique - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Conception D'un Palier Fluide Par Une Approche Mécano-Fiabiliste

K. Diop<sup>a</sup>, A. Charki<sup>b</sup>, S. Champmartin<sup>c</sup>, A. Ambari<sup>d</sup>

<sup>a, b</sup> LASQUO, Institut des sciences et techniques de l'ingénieur d'Angers, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France

<sup>c, d</sup> LAMPA, Centre Arts et Métiers Paris Tech d'Angers, 2 boulevard du Ronceray, 49035 Angers Cedex, France

**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

## 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. Pour permettre à une machine tournante de supporter de grandes charges lorsque la vitesse de rotation du rotor est nulle et garantir une excentricité relative proche de zéro, on utilise des paliers hybrides (où le gradient de pression est généré en plus par une source externe comme par exemple des orifices) [1].

Cependant, si on ne les conçoit pas d'une manière judicieuse et optimisée, leur comportement dynamique peut être instable et peut engendrer au pire la destruction de la machine. Il est donc important de pouvoir étudier leur fiabilité selon leurs caractéristiques statiques et dynamiques (qui dépendent de plusieurs paramètres tels que la longueur et le diamètre du palier, le nombre et le diamètre des orifices pour leur alimentation, la vitesse de rotation, etc.) [Charki et al].

Cet article traite de la modélisation des caractéristiques statiques d'un palier de butée circulaire en considérant un couplage mécano-fluido-fiabiliste pour étudier la fiabilité d'un palier hybride. Il est proposé une méthodologie nouvelle pour une conception fiable d'un palier en fonction des différents facteurs influents.

## 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 [Frêne] [1].

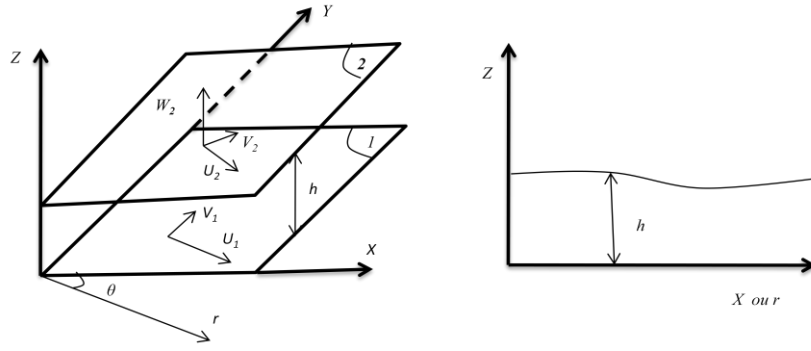


Fig. 1 Systèmes d'axes et notations

L'équation de Reynolds s'écrit donc :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\rho r h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \\ = 6r\rho(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial r} + 6\rho(V_1 - V_2) \frac{\partial h}{\partial \theta} + 6rh \frac{\partial}{\partial r} [\rho(U_1 + U_2)] \\ + 6h \frac{\partial}{\partial \theta} [\rho(V_1 + V_2) + 6\rho h(U_1 + U_2) + 12\rho r W_2 + 12rh \frac{\partial \rho}{\partial t}] \end{aligned} \quad (1)$$

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

L'équation de Reynolds simplifiée devient alors:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\rho r h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \right] = 0 \quad (2)$$

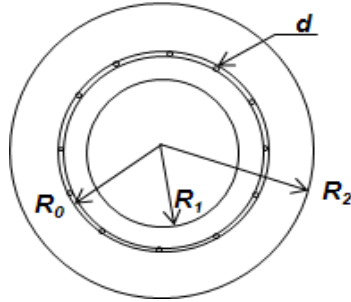


Fig. 2 Schéma du palier de butée étudié

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)

$\rho$ : masse volumique du fluide ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$ : viscosité dynamique (Pa/s),

$\nu$ : 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:

$$W = \pi P a (R_2^2 - R_1^2) + \frac{\pi(P_0 - P_a)}{2} \left( \frac{R_1^2 - R_0^2}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} - \frac{R_2^2 - R_0^2}{\ln\left(\frac{R_0}{R_2}\right)} \right) \quad (3)$$

### 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  $P_f$ .

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

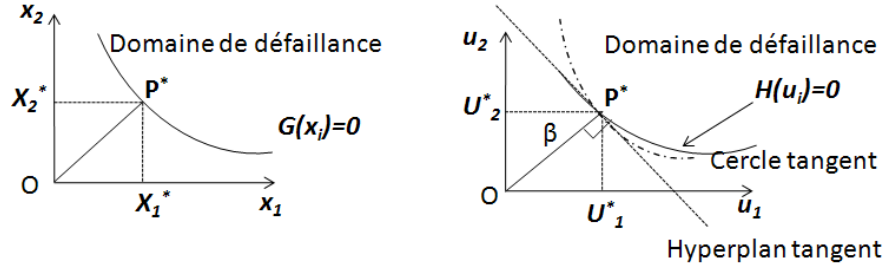


Fig. 3: Passage de l'espace physique à l'espace normé

#### 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:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(x_i) \leq 0] \quad (4)$$

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:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

Où  $\Phi$  représente la distribution multinormale normée.

L'indice de fiabilité  $\beta$  est alors déterminé par :

$$\beta = \frac{H(\mathbf{U}^*) - \nabla H(\mathbf{U}^*)\mathbf{U}^*}{\|\nabla H(\mathbf{U}^*)\|} \quad (6)$$

$H(\mathbf{U})$  la fonction d'état limite et  $\mathbf{U}^*$  le vecteur au point de conception.

## 4 Application

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

Tableau 1. Valeur des paramètres de butée.

Désignation	$R_1$	$R_0$	$R_1$	$\rho$	$P_s$	$P_a$	$d$	$C_d$	$\mu$	$n$
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  $\text{kg/m}^3$ , les pressions en Pascals, la viscosité dynamique en Pa.s.

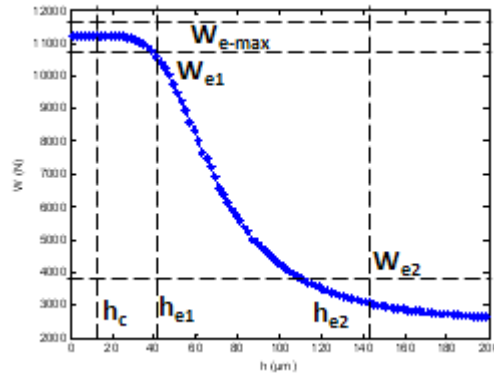


Fig.4-Evolution de la portance en fonction de l'épaisseur du fluide

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

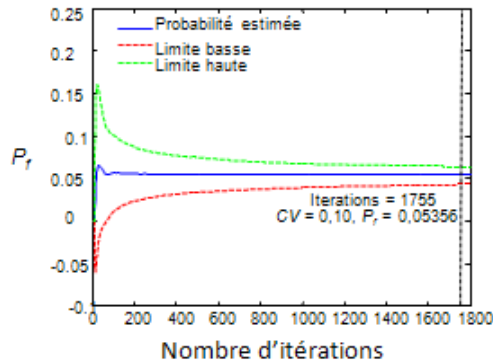


Fig. 5 Probabilité de défaillance pour  $h_{e1}$ .

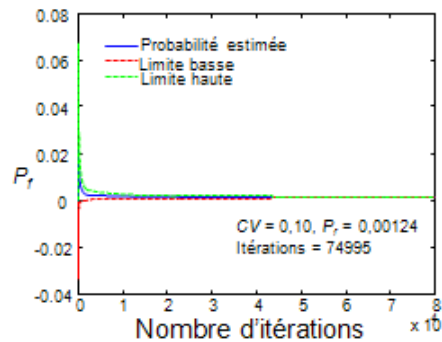


Fig. 6- Probabilité de défaillance pour  $h_{e2}$

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

Dans cet article, nous proposons une méthodologie nouvelle utile à la conception d'un palier.

L'approche fiabiliste développée montre combien il est intéressant d'estimer la probabilité de défaillance d'un palier et que sa conception peut être optimisée en fonction d'un critère de fiabilité. Une application simple a été traitée concernant un palier de butée alimentée par une source de pression à travers les orifices.

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.

Les résultats obtenus grâce à deux méthodes FORM et Monte Carlo montrent que la méthodologie développée est intéressante à explorer pour d'autres configurations, à savoir en prenant par exemple en compte un nombre de variables plus grand. FORM comme il est précisé dans la littérature, est bénéfique d'un point de vue temps de calcul.

La méthodologie proposée ici est en cours d'application dans les laboratoires LASQUO et LAMPA pour d'autres types de paliers (cylindriques, etc.).

## 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*.
- [3] Maurice Lemaire en collaboration avec AlaaChateaufneuf et Jean-Claude Mitteau (2005)[3] *Fiabilité des structures( couplage mécano-fiabiliste statique)*. Lavoisier.
- [4] F. Guerin, M. Barreau, A. Charki and A. Todoskoff (2006), *Bayésian Estimation of Failure probability in Mechanical System Using Monte Carlo Simulation*.QTQM.
- [5] Abderafi Charki, David Bigaud, Fabrice Guerin (2013), *Behavior Analysis of Machines and System Air, Hemispherical Sprindles using Finite Element Modelling*, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol.5.
- [6] Madsen H. O., Krenk S. and Lind N. C. (1986) *Structural method of safety*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.