

Etude de paliers hydrodynamiques présentant de fortes discontinuités géométriques

C. GIRAUDEAU^a, M. FILLON^b, M. HELENE^c, J. BEURAIN^d,
J. BOUYER^e

a. EDF R&D/ IMSIA/ Institut P' D3 Axe TriboLub, celia.giraudeau@edf.fr

b. Institut P' D3 Axe TriboLub, michel.fillon@univ-poitiers.fr

c. EDF R&D/ IMSIA, mathieu.helene@edf.fr

d. EDF R&D/ IMSIA, jerome.beurain@edf.fr

e. Institut P' D3 Axe TriboLub, jean.bouyer@univ-poitiers.fr

Résumé :

Lors de diverses opérations de maintenance du parc EDF, de nouvelles problématiques ont été mises en lumière. L'une d'entre elles est la dégradation des rotors et des organes de supportage du groupe turbo-alternateur. Ceci se traduit par la présence de rayures au niveau des paliers hydrodynamiques synonymes de fortes discontinuités dans le film d'huile. L'exploitant doit être en mesure de fournir un diagnostic rapide sur l'influence de celles-ci. Pour donner une réponse fiable et rapide, EDF dispose d'un logiciel qui présente, dans certaines configurations comportant des discontinuités importantes, quelques faiblesses comme la non conservation du débit lorsqu'il y a rupture puis reformation du film lubrifiant ou encore des problèmes de robustesse et de rapidité des calculs. C'est dans ce contexte que s'inscrivent ces travaux de thèse. Les différents objectifs sont une meilleure prise en compte de la physique pour les différents phénomènes étudiés, améliorer les performances et la robustesse des calculs au moyen de méthodes de résolution numériques adaptées à cette problématique particulière.

Abstract :

During various maintenance operations in power plants, some new issues have come to light. One of these issues is the degradation of the supporting and guiding components for the rotating shafts. The degradation has resulted in scratches on bearings which led to discontinuities of the oil film. The operator of the plant should provide a fast diagnosis of the influence of these scratches. However, there are some weakness in the software used: relating to its robustness, its performance and the non-conservation of the flow rate. The aim of the work done in this thesis is to examine these issues and propose solutions. The objectives are a better understanding of the physics of the phenomenon and the improvement of the performance and robustness by using adapted numerical methods.

Mots clefs : Lubrification hydrodynamique, paliers, cavitation, discontinuités géométriques

1 Introduction

Les paliers hydrodynamiques sont des éléments mécaniques essentiels des groupes turbo-alternateurs (GTA). Comme l'illustre la figure 1, sur une ligne d'arbres de GTA, plusieurs paliers sont utilisés pour le guidage en rotation du rotor. Par définition, un palier est composé d'un arbre, d'un coussinet et d'un film lubrifiant séparant ces deux premiers composants. La lubrification de ces paliers est du type hydrodynamique car les pressions, dans le film lubrifiant, sont dues au mouvement relatif de l'arbre par rapport au coussinet. Le phénomène est également connu sous le nom de « coin d'huile » ou d'effet d'entraînement de lubrifiant dans un espace convergent [1].

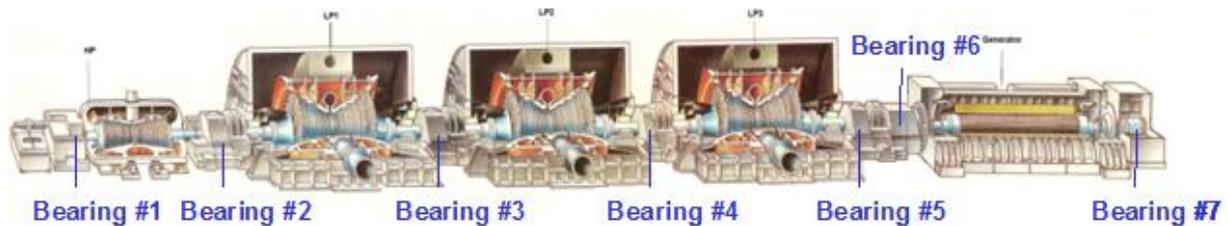


Figure 1- Ligne d'arbre de GTA

La lubrification dans un palier hydrodynamique est un problème multi-échelle et multi physique. Sur les GTA, le caractère multi-échelle est la conséquence de l'existence commune de diamètres de l'ordre du mètre pour les paliers et de jeu d'assemblage de l'ordre du millimètre entre le rotor et le palier. La charge statique peut atteindre dans certains cas 2 000 kN, supportée par un film lubrifiant d'une centaine de micromètres d'épaisseur. Le problème est également multi-physique du fait que, dans le film lubrifiant, les problèmes sont issus de la mécanique des fluides, et dans l'arbre et les coussinets les phénomènes résultent de la mécanique des solides. Par ailleurs, les effets thermiques doivent être pris en compte dans les études de paliers.

Dans la première partie des travaux de thèse, seul le calcul des pressions dans le film lubrifiant a été approfondi. Dans la suite, les différentes méthodes mises en place pour résoudre cette problématique seront présentées. L'étude d'un cas présentant de fortes discontinuités géométriques et la présentation des résultats associés termineront le document.

2 Résolution d'un problème de lubrification hydrodynamique

2.1 Modèle de Bonneau, Fatu et Souchet [2]

Après un travail de comparaison de différents modèles permettant de résoudre le champ de pression sur un domaine fluide, le choix du modèle proposé par Bonneau, Fatu, Souchet [2] a été effectué. Ce modèle permet de prendre en compte des conditions correctes aux frontières de rupture et de reformation de film lubrifiant. Celui-ci assure une conservation des débits sur le domaine étudié. Ce modèle est basé sur le modèle d'Elrod [3]. Dans les zones de film complet, la pression est résolue avec l'équation de Reynolds généralisée (Eq 1) pour les films minces, comme cela a été présenté par Frêne [1].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial \rho h}{\partial x} + \frac{\partial \rho h}{\partial t} \quad (\text{Eq 1})$$

Ici, p représente la pression, h l'épaisseur de film lubrifiant, ρ la densité volumique, μ la viscosité dynamique, ∂x la dérivée dans la direction circonférentielle et ∂z la dérivée dans la direction axiale. Dans les zones de rupture de film, la pression étant considérée constante et égale à la pression de rupture du film, on résout l'équation de conservation des débits massiques (Eq 2).

$$\frac{U}{2} \frac{\partial \rho_m h}{\partial x} + \frac{\partial \rho_m h}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq 2})$$

Où la densité volumique ρ_m correspondant à la densité volumique du mélange lubrifiant/gaz est considérée comme étant homogène. La variable $r = \frac{\rho_m h}{\rho}$, correspondant à la hauteur de film équivalente, peut être introduite dans l'équation (Eq 2). Ainsi, dans les zones de rupture de film, le champ de hauteur de film équivalent est résolu selon l'équation (Eq 3).

$$\frac{U}{2} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq 3})$$

Le modèle proposé par Bonneau, Fatu et Souchet introduit une variable ϕ , indiquant selon sa valeur la rupture ou non du film lubrifiant. À partir des équations (Eq 1) et (Eq 3) et de la variable ϕ , le problème de lubrification hydrodynamique peut se résumer sous la forme suivante (Eq 4) et (Eq 5).

$$\begin{cases} D = p - p_{cav} \text{ et } \phi = 1 & \text{dans les zones de film complet} \\ D = r - h \text{ et } \phi = 0 & \text{dans les zones de film rompu} \end{cases} \quad (\text{Eq 4})$$

$$\phi \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial D}{\partial z} \right) \right] = \rho \frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + \rho \frac{\partial h}{\partial t} + (1 - \phi) \left[\rho \frac{U}{2} \frac{\partial D}{\partial x} + \rho \frac{\partial D}{\partial t} \right] \quad (\text{Eq 5})$$

Ainsi, sur le domaine complet, en présence d'une zone de rupture de film lubrifiant ou non, seule l'équation (Eq 5) sera à résoudre.

2.2 Résolution du système linéaire

L'équation présentée précédemment (Eq 5) est appliquée à un domaine discrétisé à l'aide de la méthode des volumes finis. Le problème revient alors à résoudre l'équation linéaire suivante (Eq 6) :

$$A_E D_E + A_O D_O + A_N D_N + A_S D_S + A_P D_P = S_c \quad (\text{Eq 6})$$

Notons que A est associée à une matrice penta-diagonales.

De nombreuses méthodes numériques permettent de résoudre un tel problème. Une première partie du travail a consisté à comparer les méthodes de type direct et les méthodes de type itératif. Pour effectuer cette comparaison, LAPACK a été utilisé pour la méthode directe avec l'appel à la méthode de la décomposition LU [4]. Pour la méthode itérative, c'est la méthode de Gauss Seidel qui a été mise en place [5]. La conclusion de cette étude est que, appliquées à cette problématique particulière, les deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients. Ainsi, le choix d'une méthode « hybride » ou semi-itérative a été fait avec la mise en place de la méthode de Stone [6] (ou méthode

SIP, Strongly Implicit Procedure). Celle-ci se base sur la méthode de la décomposition LU incomplète [4]. Le système à résoudre est le suivant :

$$A D = (M - N)D = S \quad (\text{Eq 7})$$

avec M une matrice à 7 diagonales et N une matrice à 2 diagonales. La résolution de ce système de manière itérative conduit à la relation suivante :

$$M D^{n+1} = S + N D^n \quad (\text{Eq 8})$$

avec n le numéro de l'itération. Si l'on soustrait $M D^n$ à l'équation (Eq 8), on obtient alors :

$$M (D^{n+1} - D^n) = S + N D^n - M D^n = S - A D^n \quad (\text{Eq 9})$$

ou encore

$$M \delta^{n+1} = \rho^n \quad (\text{Eq 10})$$

La partie s'apparentant à une méthode directe intervient par l'intermédiaire de la relation $M=LU$ qui est injectée dans l'équation (Eq 10).

$$LU \delta^{n+1} = \rho^n \quad (\text{Eq 11})$$

La matrice L est une matrice triangulaire inférieure à 3 diagonales et la matrice U est une matrice triangulaire supérieure à 3 diagonales dont la diagonale principale est égale à 1. Avec cette dernière égalité (Eq 11), le terme hybride prend tout son sens : la méthode SIP est une résolution itérative préconditionnée. En effet, en se ramenant à un système plus simple à inverser (Eq 11), au moyen d'une méthode directe qui est par définition plus robuste, la résolution itérative est alors plus performante. Avec cet emploi du préconditionnement, le dernier champ solution convergé est utilisé pour initialiser le calcul d'une nouvelle itération de recherche de frontière que l'on distingue avec la variable ϕ (Eq 5). L'organigramme ci-dessous (Figure 2) représente la résolution générale de l'équation (Eq 5).

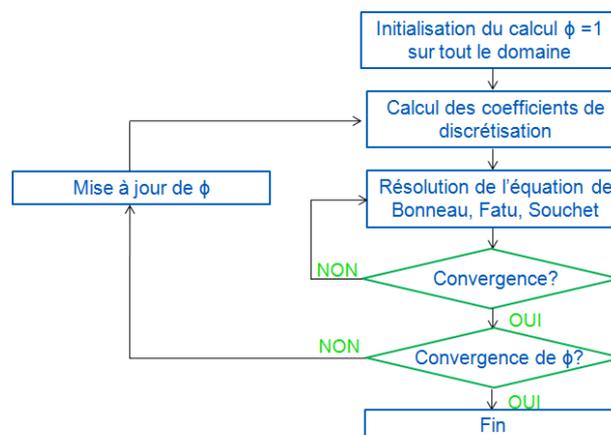


Figure 2- Organigramme résolution des champs pression et hauteur de film équivalent

La résolution du problème est centrale dans cette problématique. La méthode SIP permet d'initialiser un calcul pour un nouveau champ ϕ avec le dernier champ solution convergé tout en se ramenant à une inversion de système à chaque itération de recherche de frontière. L'utilisation d'une telle méthode,

par rapport à des méthodes directes ou itératives, permet un gain de temps pouvant atteindre deux ordres de grandeurs dans certains cas.

3 Étude de cas

Après le descriptif des méthodes de calcul mises en place, un cas présentant de fortes discontinuités géométriques est présenté et analysé. Dans un premier temps, on présente les caractéristiques du palier étudié et les différents défauts qui lui sont affectés, et dans un second temps, les résultats sont commentés.

3.1 Présentation du cas d'étude

Le palier étudié est un palier à géométrie fixe possédant deux secteurs, appelés également lobes, sur lesquels 17 rayures sont imposées. La figure 3 représente le palier étudié dans le repère global, sans défaut géométrique.

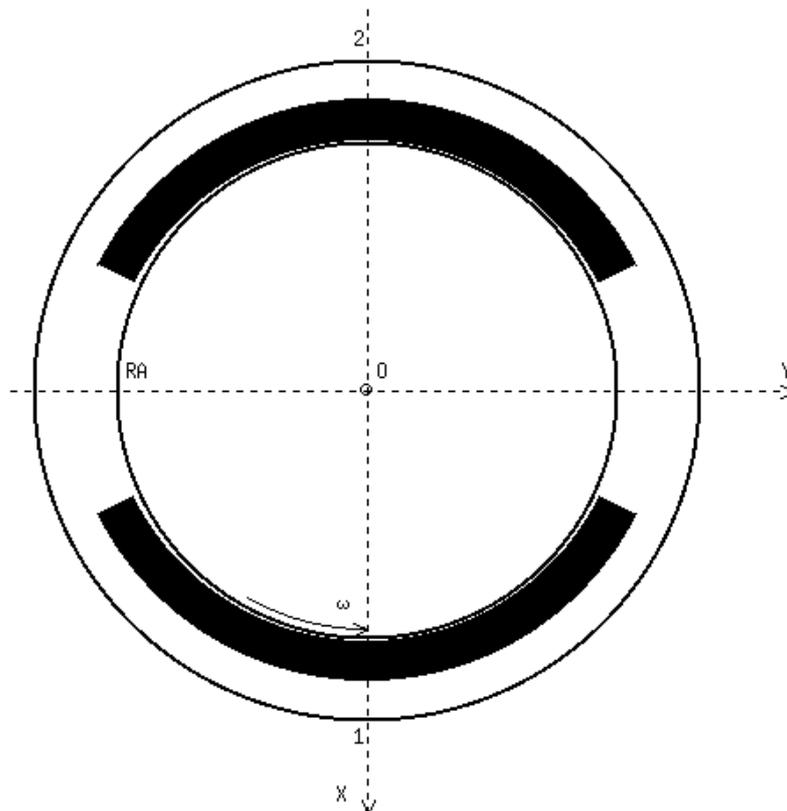


Figure 3- Représentation du palier à deux secteurs étudié sans défaut géométrique

Les données de fonctionnement sont répertoriées dans le tableau 1, ci-dessous.

Rayon de l'arbre	0,315 m
Longueur du palier	0,56 m
Jeu d'assemblage	0,000445 m
Fréquence de rotation de l'arbre	1 500 tr/min
Pression alimentation	0 Pa
Pression ambiante	0 Pa
Viscosité cinématique du lubrifiant	$6,67E^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Masse volumique du lubrifiant	$850 \text{ kg}/\text{m}^3$

Tableau 1- Caractéristique du palier en fonctionnement

Les défauts géométriques imposés sur chaque secteur sont de largeurs et de profondeurs différentes. La figure 4 présente une coupe axiale de l'épaisseur de film d'un secteur afin d'avoir une représentation des 17 rayures.

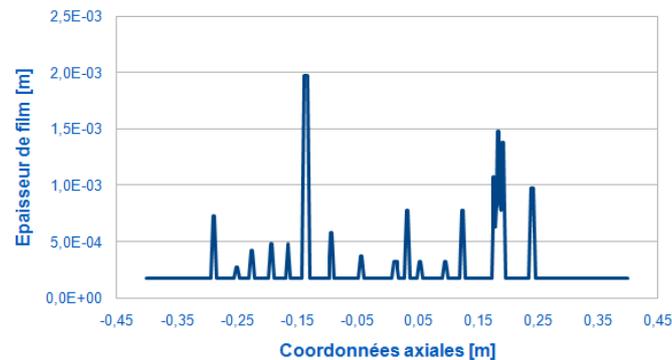


Figure 4- Coupe axiale de l'épaisseur de film d'un secteur possédant 17 rayures

Pour le maillage, le choix d'utiliser un pas variable dans la direction axiale a été fait. Ainsi, la prise en compte des rayures est faite de manière précise tout en limitant le nombre de mailles dans cette direction. Par secteur d'étude, le maillage est composé de 301 mailles dans la direction circonférentielle et de 454 mailles dans la direction axiale.

3.2 Résultats

Le calcul à charge imposée est initialisé par une position centrée de l'arbre. Le calcul atteint la position d'équilibre pour une charge totale fixée à 1 053,5 kN après 15 itérations avec la méthode de Newton-Raphson qui est utilisée pour la recherche d'équilibre.

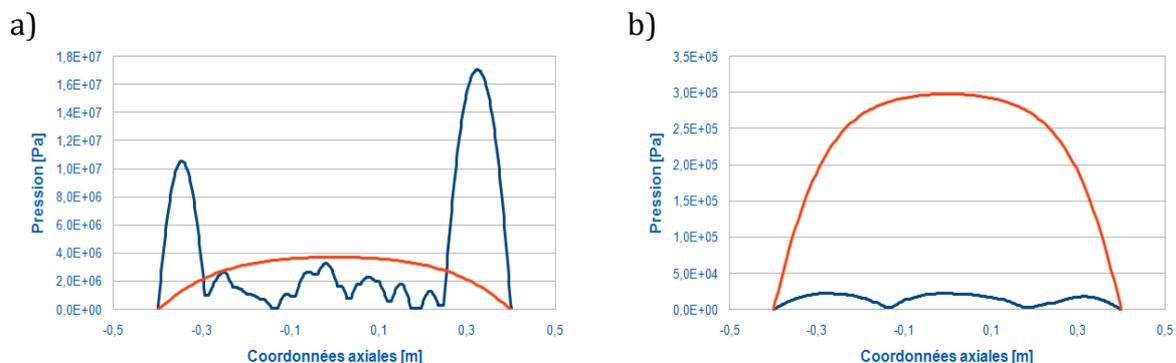


Figure 5- a) Coupe axiale de la pression du secteur inférieur pour le cas sain (courbe orange) et le cas rayé (courbe bleue)

b) Coupe axiale de la pression du secteur supérieur pour le cas sain (courbe orange) et le cas rayé (courbe bleue)

La figure 5 représente des coupes axiales des champs de pression sur les deux secteurs en comparant le cas sans dommage (absence de rayures) et le cas multi-rayures. Il est important de noter que, entre ces deux cas et pour la même charge appliquée, la position d'équilibre est nécessairement différente à cause des défauts sur le coussinet. En effet, en présence de rayures, l'arbre s'excentre un peu plus dans le palier, entraînant ainsi une diminution significative de l'épaisseur minimale du film lubrifiant. Pour le cas sain, celle-ci est de 69 μm tandis que pour le cas endommagé elle est de 16 μm . Par rapport au cas nominal, l'épaisseur minimale de film lubrifiant diminue donc de 76%. Cette épaisseur minimale

est, au même titre que la pression maximale ou la température maximale, un des paramètres de fonctionnement qui peut être critique, dans certains cas.

Sur le secteur inférieur (Figure 5 a), qui est le secteur dit « porteur » (car c'est celui qui supporte la charge appliquée), on note l'impact des rayures sur la pression. Si l'on observe les deux figures (Figure 5 a et 5 b), on remarque que les échelles de pression sont différentes. La pression maximale observée au niveau du patin inférieur est environ 600 fois plus grande que celle observée sur le patin supérieur. Dans le cas sain, ce rapport n'est que de 13. Cela est l'une des conséquences de la chute de l'épaisseur minimale du film lubrifiant induite par le déplacement de l'arbre en présence de défauts. De plus, de nombreuses diminutions abruptes du champ de pression au niveau des variations d'épaisseur de film sont visibles. Dans cette configuration (présence de rayures), la pression maximale est alors de 39,7 MPa alors que, dans le cas sans défaut, elle est égale à 7,66 MPa. Une augmentation de 518% de la pression maximale est observée. La présence de ces défauts crée des zones de surpressions pour être en mesure de supporter le poids du rotor et cela peut entraîner des dégradations plus importantes du palier.

La profondeur des rayures influe sur la chute brutale ou non de la pression. En effet, plus la rayure est profonde, plus le champ de pression diminue et cela, jusqu'à une profondeur critique pour laquelle la pression atteint la pression de rupture. Après ce seuil, l'augmentation de la profondeur de la rayure n'a plus d'influence. La position des différentes rayures influence également la répartition de pression.

Le fonctionnement d'un palier sain et d'un palier présentant de nombreuses discontinuités est différent. Comme cela a été souligné, la présence de rayures entraîne une baisse de l'épaisseur de film lubrifiant, une augmentation de la pression maximale mais également un changement significatif de la température de fonctionnement. Actuellement, les paliers actifs sur le parc sont surveillés par deux sondes de température. Il devient alors primordial de prendre en compte les phénomènes thermiques dans le modèle théorique de prédiction du comportement du palier.

Conclusion et perspectives

Cette première partie de nos travaux de recherche a permis, à l'aide de méthode de résolution conservative et performante, de traiter, en régime isotherme, des cas d'étude présentant des discontinuités géométriques importantes avec un temps de calcul relativement réduit. En effet, l'utilisation des différentes méthodes présentées préalablement a permis de pouvoir traiter le cas présenté en 11 heures et 30 minutes. Avec les moyens de calculs actuels, l'obtention d'une solution, sans hypothèses simplificatrices, est inenvisageable. Cela représente un des enjeux importants dans l'industrie car il faut, dans un délai raisonnable, pouvoir fournir une analyse précise et fiable lorsqu'un ou des défauts sont identifiés.

À la suite de ces travaux, les phénomènes thermiques seront intégrés à cette résolution et, à plus long terme, le code développé pourra être couplé avec Code_Aster [7] afin d'effectuer des calculs de type TEHD (Thermo-Elasto-Hydro-Dynamique) qui prendront alors en compte les déformations des solides.

En parallèle, une campagne d'essais va être menée à l'Institut Pprime afin d'avoir des éléments de comparaison afin de valider le code de calcul développé.

Références

- [1] J. Frêne, D. Nicolas, B. Degueurce, D. Berthe, M. Godet, *Lubrification hydrodynamique paliers et butées*, Eyrolle, Paris, 1990
- [2] D. Bonneau, A. Fatu, D. Souchet, *Paliers hydrodynamiques1, équations, modèles numériques isothermes et lubrification mixte*, Lavoisier, Paris, 2011
- [3] H.G. Elrod, A cavitation algorithm, *ASME Journal of Lubrication Technology*, 1981, Vol. 103, pp. 350-354
- [4] E. Anderson, Z. Bai, C. Bischof, S. Blackford, J. Demmel, J. Dongarra, S. Hammarling, *Lapack user guide*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999, ISBN 0-89871-447-8
- [5] J.H. Ferziger, M. Perić, *Computational methods for fluid dynamics*, 3rd edition, 2002, Springer, ISBN 3-540-42074-6
- [6] H.L. Stone, Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1968, Vol. 5, pp. 530-558
- [7] www.code-aster.org