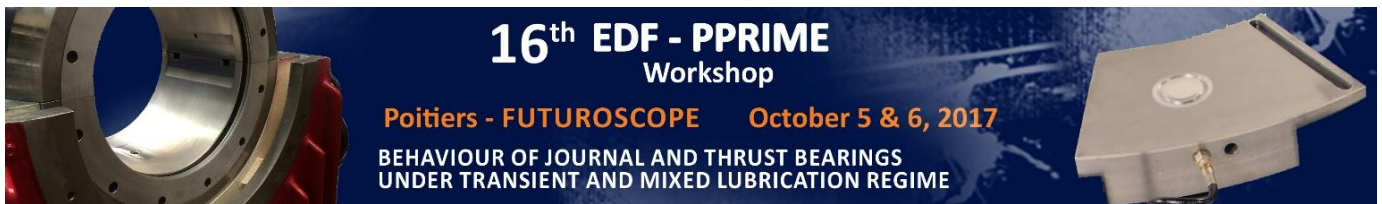




# Book of Abstracts

## Recueil des résumés



Final version - October 4, 2017



<http://edf-pprime-2017.sciencesconf.org>



# 16<sup>th</sup> EDF - PPRIME Workshop

October 5 & 6, 2017

Poitiers - FUTUROSCOPE

## BEHAVIOUR OF JOURNAL AND THRUST BEARINGS UNDER TRANSIENT AND MIXED LUBRICATION REGIME

This workshop is primarily intended to provide an opportunity for researchers and practitioners from Industry and Academia to gather and share their knowledge regarding the behaviour of journal and thrust bearings under transient and mixed lubrication regime and particularly during the start-up and shutdown periods or during turning speed operation.

The conferences shall offer to the participants the opportunity to study the latest theories on this subject and to identify the problems met by industrials by favouring a common approach. This event is the result of collaboration between the Electricité de France and the Département Génie Mécanique et Systèmes Complexes of the Institut Pprime (UPR 3346, CNRS - Université de Poitiers - ISAE-ENSMA). Furthermore, the workshop is organised under the auspices of the French section of the ASME and of AFM.

### MAIN TOPICS

- Start-up and shutdown periods,
- Low speed operation (turning speed),
- Multiphysics coupling: dynamic and thermal behaviour,
- Condition monitoring: detection and control,
- Failure analysis and industrial feedback
- ...

### ADDITIONAL INFORMATION

- The manuscript should be written preferably in English,
- The conference language is English, without simultaneous translation,
- The presentation of contributions will consist in oral communications (30 minutes including questions and discussions) or in posters.

### KEYNOTE SPEAKER

**ANDREAS SCHUBERT**, R&D LEAD ENGINEER - MECHANICAL,  
GE Renewable Energy,  
Birr, Switzerland.

### SCIENTIFIC COMMITTEE

M. FILLON, CNRS Director of Research, Pprime  
M. ARGHIR, Professor, Pprime  
J. BEURAIN, Research Engineer, EDF  
O. BONNEAU, Professor, Pprime  
J. BOUYER, Associate Professor, Pprime  
N. BRUNETIÈRE, CNRS Researcher, Pprime  
A. FATU, Professor, Pprime  
V. GUY, Research Engineer, EDF  
M.A. HASSINI, Research Engineer, EDF  
M. HÉLÈNE, Research Engineer, EDF

### ORGANISING COMMITTEE

L. ARTUS, Secretary, Pprime  
J. BEURAIN, Research Engineer, EDF  
A. BLOUIN, Associate Professor, Pprime  
J. BOUYER, Associate Professor, Pprime  
N. BRUNETIÈRE, CNRS Researcher, Pprime  
M. FILLON, CNRS Director of Research, Pprime - Chairman  
P. JOLLY, Research Engineer, Pprime

### KEYNOTE DATES

May 13, 2017 ..... Abstract submission  
May 26, 2017 ..... Notification of acceptance  
July 07, 2017 ..... Paper submission (maximum 8 to 12 pages)  
July 21, 2017 ..... Deadline for early bird registration  
September 15, 2017 ..... Deadline for registration

Abstracts and papers to be submitted directly on the workshop web site: <http://edf-pprime-2017.sciencesconf.org>

Registration should be completed at:  
<https://www.azur-colloque.fr/DR08/>

### INFORMATION AND CONTACT

Michel FILLON: +33 5 49 49 65 43

Laurence ARTUS: +33 5 49 49 65 01 - Fax : +33 5 49 49 65 04

Email: [edf-pprime-2017@sciencconf.org](mailto:edf-pprime-2017@sciencconf.org)

Web site: <http://edf-pprime-2017.sciencesconf.org>



# 16<sup>ème</sup> Journée Technique EDF - PPRIME

5 & 6 Octobre 2017

Poitiers - FUTUROSCOPE

## COMPORTEMENT DES PALIERS ET BUTÉES EN RÉGIME DE LUBRIFICATION TRANSITOIRE ET MIXTE

L'objectif de cette conférence est de permettre aux industriels et aux chercheurs universitaires de se rencontrer et de partager leurs expériences relatives au comportement des paliers et butées en régime de lubrification transitoire et mixte qui interviennent lors des phases de démarrage, d'arrêt ou de virage.

Cette journée peut ainsi offrir l'opportunité aux différents participants de connaître les derniers travaux réalisés dans ce domaine, d'identifier les problèmes rencontrés par les industriels, tout en favorisant une réflexion commune sur des thèmes d'intérêt général. Cette conférence est organisée conjointement par le Département Génie Mécanique et Systèmes Complexes de l'Institut Pprime (UPR 3346, CNRS-Université de Poitiers - ISAE-ENSMA) et par EDF R&D qui bénéficie d'une longue expérience en termes de modélisation et d'exploitation de machines tournantes. Cette journée technique a lieu sous couvert de la section française de l'ASME et de l'AFM.

### DOMAINES PRIVILÉGIÉS :

- Phases de démarrage et arrêt,
- Fonctionnement à faible vitesse (virage),
- Couplage multi-physique : comportement dynamique et thermique,
- Evaluation des performances, optimisation, surveillance,
- Retour d'expérience industrielle,
- ...

### INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES :

- Les textes sont écrits de préférence en anglais.
- Les présentations orales sont réalisées en anglais et ont une durée de 30 minutes (questions et discussions comprises) ou par affiches

### CONFÉRENCIER INVITÉ

ANDREAS SCHUBERT, R&D LEAD ENGINEER - MECHANICAL,  
GE Renewable Energy,  
Birr, Switzerland.

### COMITÉ SCIENTIFIQUE

M. FILLON, Directeur de Recherche CNRS, Pprime  
M. ARGHIR, Professeur, Pprime  
J. BEURAIN, Ingénieur de Recherche, EDF  
O. BONNEAU, Professeur, Pprime  
J. BOUYER, Maître de Conférences, Pprime  
N. BRUNETIÈRE, Chargé de Recherche CNRS, Pprime  
A. FATU, Professeur, Pprime  
V. GUY, Ingénieur de Recherche, EDF  
M.A. HASSINI, Ingénieur de Recherche, EDF  
M. HÉLÈNE, Ingénieur de Recherche, EDF

### COMITÉ D'ORGANISATION

L. ARTUS, Secrétaire, Pprime  
J. BEURAIN, Ingénieur de Recherche, EDF  
A. BLOUIN, Maître de Conférences, Pprime  
J. BOUYER, Maître de Conférences, Pprime  
N. BRUNETIÈRE, Chargé de Recherche CNRS, Pprime  
M. FILLON, Directeur de Recherche CNRS, Pprime - Président  
P. JOLLY, Ingénieur de Recherche, Pprime

### DATES IMPORTANTES

13 mai 2017 ..... Date limite de soumission des résumés  
26 mai 2017 ..... Notification d'acceptation  
07 juillet 2017 ..... Date limite de soumission des textes (8 à 12 pages maxi.)  
21 juillet 2017 ..... Date limite pour une inscription à tarif préférentiel  
15 septembre 2017 ..... Date limite d'inscription

Résumé et texte sont à soumettre directement sur le site du workshop : <http://edf-pprime-2017.sciencesconf.org>

Enregistrement à réaliser sur le site azur-colloque : <https://www.azur-colloque.fr/DR08/>

### INFORMATIONS ET CONTACT

Michel FILLON : +33 5 49 49 65 43  
Laurence ARTUS : +33 5 49 49 65 01 - Fax : +33 5 49 49 65 04  
Email : [edf-pprime-2017@sciencesconf.org](mailto:edf-pprime-2017@sciencesconf.org)  
Site web : <http://edf-pprime-2017.sciencesconf.org>



**“Behaviour of journal and thrust bearings  
under transient and mixed lubrication regime”**

**Thursday October 5, 2017**

7h30-8h20	<i>Registration</i>
8h20-8h40	<i>General introduction by EDF, University of Poitiers, SFA &amp; Pprime – Presentation of the program</i>
8h45-9h25	<b>Keynote session</b> <b>A) “<u>Special operating conditions of bearings: Application to tilting pad thrust bearings of vertically aligned hydro machines</u>”</b> <b>Schubert A., Neubauer P.</b> <i>GE Renewable Energy Hydro, Switzerland.</i>
9h25-9h35	<i>Questions</i> <span style="float: right;"><i>Chairman: A. Dadouche</i></span>
9h35-9h45	<i>ISO Standards</i> <span style="float: right;"><i>Chairman: M. Fillon</i></span>
9h45-10h00	<i>Presentation of the posters</i> <span style="float: right;"><i>Chairman: J. Bouyer</i></span>
10h00-10h30	<i>Coffee Break - POSTER Session</i>
10h30-11h00	<b>Technical session 1: Transient and mixed lubrication regimes</b> <b>B) “<u>Theoretical and experimental investigations on transient run-up procedures of journal bearings including mixed friction conditions</u>”</b> <b>Prölb M., Zemella P., Hagemann T., Schwarze H.</b> <i>Clausthal University of Technology, Germany.</i>
11h00-11h30	<b>C) “<u>Friction and wear analysis of journal bearings exposed to repeated start and stop cycles</u>”</b> <b>Sander D.E.</b> <i>Virtual Vehicle Research Center, Austria.</i>
11h30-12h00	<b>D) “<u>Analysis of bearing seizure of a PTFE central groove journal bearing during startup period</u>”</b> <b>Pap B., Guillemont M., Fillon M., Geudry D., Gédin P., Drevon F., Biadalla L., Becquerelle S., Safran Transmission Systems, France, Institut Pprime, France.</b> <span style="float: right;"><i>Chairman: N. Péton</i></span>
12h15-13h45	<i>Lunch</i>
14h00-14h30	<b>Technical session 2: Bearing failures</b> <b>E) “<u>Toward Quantitative Analysis of Thrust Shoe Damage</u>”</b> <b>Branagan L.A.</b> <i>Pioneer Motor Bearing Company, USA.</i>
14h30-15h00	<b>F) “<u>Hydrodynamic film thickness measurements and CFD analysis identify the root causes of repetitive thrust bearing failure on 45 MW hydro generating unit at Hydro-Québec</u>”</b> <b>Gauvin P., Huard, P.</b> <i>Hydro-Québec Production, Canada.</i>
15h00-15h30	<b>G) “<u>Nano-soldering pseudo-composite material to decrease engine bearing failure</u>”</b> <b>Olaru P.</b> <i>Metallurgy &amp; SCO Expert Pool. CH-6006, Luzern, Switzerland.</i> <span style="float: right;"><i>Chairman: E. Gust</i></span>
15h30-16h15	<i>Coffee Break - Discussions - POSTER Session</i>
16h15-16h45	<b>Technical session 3: Bearing materials and water lubricated bearings</b> <b>H) “<u>New high strength white metal bearings applicable to higher performance machinery</u>”</b> <b>Toda K., Hara T., Inoue E., Nakano M., Tanaka T.</b> <i>DAIDO METAL CO, Japan.</i>
16h45-17h15	<b>I) “<u>Development of lead free sliding bearing materials for high dynamic loads: Theory of the formation of the structure of sliding bearings based on monotectic alloys</u>”</b> <b>Gust E., Gzovskyy K.</b> <i>ZOLLERN BHW Gleitlager GmbH &amp; Co, Germany.</i>
17h15-17h45	<b>J) “<u>Polymer journal bearings behaviour research under limited lubrication and cooling conditions conducted on high torque test rig</u>”</b> <b>Barszczewska A., Litwin W.</b> <i>Gdansk University of Technology, Poland.</i> <span style="float: right;"><i>Chairman: L. Branagan</i></span>
18h15	<i>Departure for the Car Museum and dinner (mandatory registration)</i>



**“Behaviour of journal and thrust bearings  
under transient and mixed lubrication regime”**

**Friday October 6, 2017**

7h30-8h30	<i>Registration – Coffee</i>
	<b>Technical session 4: Vibration, dynamic and bearing design</b>
8h00-8h30	<b>K) “<u>Effect of Dimple Depth on the Dynamic Characteristics of Fully Textured Journal bearings</u>”</b> <i>Taura, H., Yamada, H., Kaneko S. Nagaoka University of Technology, Japan.</i>
8h30-9h00	<b>L) “<u>Case study about Oil Whirl on a gas compressor</u>”</b> <i>Drygin S., Péton N. GE Oil&amp;Gas, Russia, GE Oil&amp;Gas, France.</i>
9h00-9h30	<b>M) “<u>Implementation of a four-wedge bearing R4T on high-pressure turbines of large steam turbine generators up to 1100 MW / 3000 rpm</u>”</b> <i>Huster J., Cooper P., Demailly D. GE Power AG, Switzerland, GE Power AG, UK.</i>
9h30-10h00	<b>N) “<u>Design optimization of a turbocharger thrust bearing using a CFD-based THD computational approach</u>”</b> <i>Charitopoulos A.G., Papadopoulos C.I., National Technical University of Athens, Greece.</i> <i align="right">Chairman: A. Schubert</i>
10h00-10h30	<i>Coffee Break - POSTER Session</i>
	<b>Technical session 5: Thermal effects under laminar and turbulent flow regime</b>
10h30-11h00	<b>O) “<u>Theoretical transient thermal studies on an eight-pad thrust bearing</u>”</b> <i>Zeh C., Hagemann T., Kraft C., Schwarze H. Clausthal University of Technology, Germany.</i>
11h00-11h30	<b>P) “<u>Field tests on hydrodynamic and hybrid operation of a bi-directional thrust bearing of a pump-turbine</u>”</b> <i>Dąbrowski L., Wasilczuk M. Wodtke M. Gdansk University of Technology, Poland.</i>
11h30-12h00	<b>Q) “<u>Improvement of the thrust bearing calculation considering the convective heating within the space between the pads</u>”</b> <i>Chmielowiec-Jablczyk M., Schubert A., Kraft C., Schwarze H., Wodtke M., Wasilczuk M. GE Renewable Energy Hydro, Switzerland, Gdansk University of Technology, Poland.</i>
12h00-12h30	<b>R) “<u>THD analysis of a LEG TPJB considering both laminar and turbulent</u>”</b> <i>Croné P., Almqvist A., Larsson R. Lulea University of Technology, Sweden.</i> <i align="right">Chairman: A. Hassini</i>
12h45-14h15	<i>Lunch</i>
	<b>Technical session 6: Dynamic behavior and controllable journal bearings</b>
14h30-15h00	<b>S) “<u>Controllable Sliding Bearings &amp; Controllable Lubrication Principles – An Overview</u>”</b> <i>Santos I.F. Technical University of Denmark, Denmark.</i>
15h00-15h30	<b>T) “<u>Comparison of Reynolds Equation and CFD Simulations for Evaluation of a Grooved Journal Bearing with Injection</u>”</b> <i>Pierson K.C., Braun M.J., Snyder T.A. The University of Akron, USA.</i>
15h30-16h00	<b>U) “<u>Real-time alignment and operation optimization of turbine shaft trains using adjustable bearings</u>”</b> <i>Chasalevris A., Guignier G. GE Oil &amp; Gas, UK.</i>
16h00-16h30	<b>V) “<u>Characterization of high power turbomachinery tilting pad journal bearings: first results obtained on a novel test bench</u>”</b> <i>Ciulli E, Forte P, Libraschi M., Maestrale F., Naldi L., Nuti M. University of Pisa, Italy, GE Oil &amp; Gas, Italy, AM Testing srl, Italy.</i> <i align="right">Chairman: C. Papadopoulos</i>
16h30-16h45	<i>SF ASME Best poster award - Closure</i>
16h45-18h00	<i>Visit - Tribology Test Rigs (PROMETEE) (mandatory registration)</i>

**“Behaviour of journal and thrust bearings  
under transient and mixed lubrication regime”**

**POSTER SESSIONS - October 5 & 6, 2017**

10h00-10h30  
&  
15h30-16h15

- 1) [“A numerical model of mechanical interaction of rough surfaces of the journal bearings of the piston engine”](#)  
Goritskiy Y., Brazhnikova Y., Gavrilov K., Rozhdestvenskiy Y. *National Research University “MPEI”, South Ural State University, Russia.*
- 2) [“Comparison of perturbed Reynolds equation and CFD models for the prediction of dynamic coefficients of sliding bearings”](#)  
Snyder T.A., Braun M.J. *The University of Akron, USA.*
- 3) [“Effect of the sliding element surface texture on the oil film thickness under starved lubrication conditions”](#)  
Galda L., Sep J., Prucnal S. *Rzeszow University of Technology, Poland.*
- 4) [“Influence of speed on the static performance characteristics of hole entry worn hybrid conical journal bearing”](#)  
Phalle V. M., Pawar S. R., Khaske P. G. *VJTI Mumbai 40019, India, Air India Engineering Service Ltd, India.*
- 5) [“Investigation of the effect of non-isothermal flow of non-Newtonian fluid in a thin layer on thermal state and working ability of the tribo-unit”](#)  
Zadorozhnaya E., Levanov I. *South Ural State University, Russia.*
- 6) [“Misalignment cases on machine trains of CC Power Plants”](#)  
Miniello F., Peton N. *GE Oil & Gas, Spain, GE Oil & Gas, France.*
- 7) [“Non-invasive in-situ measurement of lubricant film thickness and viscosity for hydrodynamic bearings”](#)  
Brunskill H., Schirru M., Dwyer-Joyce R. *Leonardo Centre for Tribology, University of Sheffield, UK.*
- 8) [“Non-stationary oil film force database for hydrodynamic journal bearing”](#)  
Wang W., Zhang K.C. *Shanghai University, China.*
- 9) [“Predicting lifetime of IC engine crankshaft connecting rod bearings at the design stage”](#)  
Levanov I., Zadorozhnaya E., Lashmanov V., Eschiganov M. *South Ural State University, Russia.*
- 10) [“Probe track run-out identification and compensation to benefit machinery diagnostics”](#)  
Barrowclough P., Peton N. *GE Oil & Gas, UK, GE Oil & Gas, France.*
- 11) [“Substantiation of reduction of mixed lubrication effect in hybrid bearings based on the load separation principle”](#)  
Polyakov R., Fetisov A., Savin L. *Orel State University, Russia.*





# Table of contents

<b>Keynote</b>	<b>1</b>
Special operating conditions of bearings: Application to tilting pad thrust bearings of vertically aligned hydro machines, Schubert Andreas [et al.] . . . . .	3
<b>1: Transient and mixed lubrication regime</b>	<b>5</b>
Theoretical and experimental investigations on transient run-up procedures of journal bearings including mixed friction conditions, Prölß Maximilian [et al.] . . . . .	7
Friction and wear analysis of journal bearings exposed to repeated start and stop cycles, Sander David . . . . .	9
Analysis of bearing seizure of a PTFE central groove journal bearing during startup period, Pap Bálint [et al.] . . . . .	11
<b>2: Bearings failures</b>	<b>13</b>
Toward Quantitative Analysis of Thrust Shoe Damage, Branagan Lyle . . . . .	15
Hydrodynamic film thickness measurements and CFD analysis identify the root causes of repetitive thrust bearing failures on 45 MW hydro generating unit at Hydro-Québec, Gauvin Pierre [et al.] . . . . .	16
Nano-soldering pseudo-composite material to decrease engine bearing failure, Olaru Paul . . . . .	17
<b>3: Bearings materials and water lubricated bearings</b>	<b>19</b>
New high strength white metal bearings applicable to higher performance machinery, Toda Kazuaki [et al.] . . . . .	21
Development of lead free sliding bearing materials for high dynamic loads: Theory of the formation of the structure of sliding bearings based on monotectic alloys, Gust Edgar . . . . .	23

Polymer journal bearings behaviour research under limited lubrication and cooling conditions conducted on high torque test rig, Barszczewska Agnieszka [et al.] . . . . .	24
<b>4: Vibration, dynamic and bearing design</b>	<b>25</b>
Effect of Dimple Depth on the Dynamic Characteristics of Fully Textured Journal bearings, Taura Hiroo [et al.] . . . . .	27
Case study about Oil Whirl on a gas compressor, Peton Nicolas [et al.] . . . . .	28
Implementation of a four-wedge bearing R4T on high-pressure turbines of large steam turbine generators up to 1100 MW / 3000 rpm, Huster Josef [et al.] . . . . .	29
Design optimization of an automotive turbocharger thrust bearing using a CFD-based THD computational approach, Charitopoulos Anastassios [et al.] . . . . .	30
<b>5: Thermal effects under laminar and turbulent flow regime</b>	<b>33</b>
Theoretical transient thermal studies on an eight-pad thrust bearing, Zeh Christopher [et al.] . . . . .	35
Field tests on hydrodynamic and hybrid operation of a bi-directional thrust bearing of a pump-turbine, Wasilczuk Micha l [et al.] . . . . .	36
Improvement of the thrust bearing calculation considering the convective heating within the space between the pads, Schubert Andreas [et al.] . . . . .	35
THD analysis of a LEG TPJB considering both laminar and turbulent flow, Croné Philip [et al.] . . . . .	36
<b>6: Dynamic behavior and controllable journal bearings</b>	<b>39</b>
Controllable Sliding Bearings & Controllable Lubrication Principles – An Overview, Santos Ilmar . . . . .	41
Comparison of perturbed Reynolds equation and CFD models for the prediction of dynamic coefficients of sliding bearings, Snyder Troy [et al.] . . . . .	43

Real-time alignment and operation optimization of turbine shaft trains using adjustable bearings, Chasalevris Athanasios . . . . .	44
Characterization of high power turbomachinery tilting pad journal bearings: first results obtained on a novel test bench, Ciulli Enrico [et al.] . . . . .	46
<b>Posters</b>	<b>47</b>
A numerical model of mechanical interaction of rough surfaces of the journal bearings of the piston engine, Gavrilov Konstantin [et al.] . . . . .	49
Comparison of Reynolds Equation and CFD Simulations for Evaluation of a Grooved Journal Bearing with Injection, Pierson Kristopher [et al.] . . . . .	50
Effect of the sliding element surface texture on the oil film thickness under starved lubrication conditions, Galda Lidia [et al.] . . . . .	51
Influence of speed on the static performance characteristics of hole entry worn hybrid conical journal bearing, Phalle Vikas [et al.] . . . . .	52
Investigation of the effect of non-isothermal flow of non-Newtonian fluid in a thin layer on thermal state and working ability of the tribo-unit, Zadorozhnaya Elena [et al.] . . . . .	53
Misalignment cases on machine trains of CC Power Plants, Peton Nicolas [et al.] . . . . .	54
Non-invasive in-situ measurement of lubricant film thickness and viscosity for hydrodynamic bearings, Brunskill Henry [et al.] . . . . .	56
Non-stationary oil film force database for hydrodynamic journal bearing, Wang Wen [et al.] . . . . .	57
Predicting lifetime of IC engine crankshaft connecting rod bearings at the design stage, Levanov Igor [et al.] . . . . .	59
Probe track run-out identification and compensation to benefit machinery diagnostics, Peton Nicolas [et al.] . . . . .	60
Substantiation of reduction of mixed lubrication effect in hybrid bearings based on the load separation principle, Polyakov Roman [et al.] . . . . .	61
<b>Author Index</b>	<b>62</b>



# Keynote





## **Special operating conditions of bearings: Application to tilting pad thrust bearings of vertically aligned hydro machines**

### **Paliers fonctionnant en conditions particulières: application aux butées à patins oscillants des machines hydroélectriques verticales**

Schubert A <sup>a</sup> and Neubauer P <sup>a</sup>

*a GE Renewable Energy Hydro (Switzerland), Zentralstrasse 40, 5242 Birr Switzerland.*

**Keywords:** hydrodynamic bearing, bearing coating, transient regime, mixed friction, vertical shaft alignment  
**Mots clés:** paliers et butées hydrodynamiques, revêtement, régime transitoire, frottement mixte, alignement d'arbre vertical

Hydrodynamic bearings of rotating machines are mainly designed for the rated operating conditions. However, the transient conditions influence the bearing size too. In vertically aligned hydro machines from GE, the thrust bearing supports the high load because of the rotor weight and the axial hydraulic load. The guide bearings support the lower radial loads. Transient conditions with their influence on the bearing design are the focus in this presentation.

The transient regime occurs for example during start-up and shutdown periods, during heating of the oil due to lack of cooling capacity or a rapid speed increase due to runaway. During these relatively short periods of time the bearings operate with thinner oil films and higher temperatures. Consequently, other load capacity design limits than for rated operating condition must be used. Calculation methods to estimate the transient behaviour like FSI (Fluid Structure Interaction) will be described. In extreme cases a mixed friction could happen at low speed or very high load. Some latest updates on research and development regarding this topic will be also reported. Modern bearing coating materials can influence the behaviour at transient and mixed lubrication regimes. The conventional Whitmetal (Babbitt) coating with a temperature limit near 120°C could be replaced by other materials for example by polymers with higher temperature limits and lower wear.

Les paliers hydrodynamiques des machines tournantes sont principalement conçus pour les conditions de fonctionnement nominales. Cependant, les conditions transitoires influent également sur la taille des paliers. Dans les machines hydroélectriques alignées verticalement de GE, la butée supporte une charge élevée en raison du poids du rotor et de la charge hydraulique axiale. Les paliers de guidage supportent les charges radiales les plus faibles. Les conditions transitoires ainsi que leur influence sur la conception des paliers sont les sujets principaux de cette présentation.

Le régime transitoire se produit par exemple pendant les phases de démarrage et d'arrêt, pendant l'échauffement de l'huile en raison du manque de capacité de refroidissement ou d'une augmentation rapide de la vitesse due à la vitesse de l'arrêt. Pendant ces périodes relativement courtes, les paliers fonctionnent avec des films d'huile plus fins et des températures plus élevées. Par conséquent, d'autres limites de conception que pour une condition de fonctionnement nominale doivent être utilisées. Des méthodes de calcul pour estimer le comportement transitoire comme FSI (Fluid Structure Interaction) seront décrites. Dans les cas extrêmes, un frottement mixte peut se produire à faible vitesse ou à une charge très élevée. Certaines dernières mises à jour sur la recherche et le développement concernant ce sujet seront également rapportées. Les matériaux de revêtement de palier modernes peuvent influencer le comportement dans des régimes de lubrification transitoire et mixte. Le revêtement classique régule avec une limite de température proche de 120 ° C pourrait être remplacé par d'autres matériaux comme par exemple des polymères avec des limites de température plus élevées et une usure moindre.



# **1: Transient and mixed lubrication regime**





**Theoretical and experimental investigations on transient run-up procedures of journal bearings including mixed friction conditions**  
**Etude théorique et expérimentale transitoire du démarrage de paliers hydrodynamiques avec prise en compte des conditions de lubrification mixte**

Pröbß M <sup>a</sup>, Zemella P <sup>a</sup>, Hagemann T <sup>a</sup> and Schwarze H <sup>a</sup>

*a Institute of Tribology and Energy Conversion Machinery, Clausthal University of Technology, Leibnizstraße 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany.*

**Keywords:** Journal bearing, run-ups, mixed friction, transient energy equation, experimental validation.  
**Mots clés:** Palier hydrodynamique, démarrage, frottement mixte, équation de l'énergie en transitoire, validation expérimentale

This paper focuses on operating behaviour of journal bearings for industrial machinery application during run-ups. For this purpose the numerical simulation code COMBROS R that is based on a two-dimensional extended and generalized Reynolds equation and a full three-dimensional energy equation was advanced by a theoretical model considering effects of mixed friction and warming of journal components during start-up. The mixed friction routine contains the elastic contact model proposed by Greenwood and Williamson, considers influence of rough surfaces by regarding flow factors and calculates an additional stiffness and dissipation in areas with solid interactions. Further, a transient term was added in the energy equation to consider the thermal inertia of shaft and shell and to ensure a realistic heating during run-ups.

Results of prediction are compared with experimental data from a special test rig built up for validation procedures. Besides the conventional sensors for temperature, oil flow and relative motion between shaft and stator a contact resistance measurement was installed to determine the intensity of mixed friction.

The evaluation of experimental data by Stribeck curves based on a shaft torsion measurement indicates a significant influence of run-up time on frictional moment. A decrease of run-up time reduces the frictional coefficient in the mixed-friction region while the opposite relation is observed in the hydrodynamic regime. Concordantly with experimental data these tendencies are predicted by the numerical code, however, only if the transient energy model is applied.

Cet article s'intéresse au comportement des paliers hydrodynamiques de machines industrielles lors des phases de démarrage. À cette fin, le code de simulation COMBROS R, qui repose sur une forme étendue et généralisée de l'équation de Reynolds et 2D et sur une équation tridimensionnelle de l'énergie, a été complété par un modèle théorique tenant compte des effets du frottement mixte et du réchauffement des composants du palier lors du démarrage. Ce modèle de contact élastique est proposé par Greenwood et Williamson, et prend en compte l'influence des surfaces rugueuses en considérant les coefficients de débit et calcule une raideur et une dissipation supplémentaires dans les zones où il y a interaction avec les solides. En outre, un terme transitoire a été ajouté dans l'équation d'énergie pour tenir compte de l'inertie thermique de l'arbre et du coussinet et assurer un transitoire thermique réaliste de la phase de démarrage. Les résultats des calculs sont comparés aux données expérimentales provenant d'une plateforme d'essai spéciale conçue pour la validation. Outre les capteurs conventionnels pour la température, le débit d'huile et le mouvement relatif entre l'arbre et le stator, une mesure de résistance de contact a été installée pour déterminer l'intensité du frottement mixte. L'évaluation des données expérimentales par les courbes de Stribeck, basées sur une mesure de torsion de l'arbre, indique une influence significative du temps de démarrage sur le couple de frottement. Une diminution du temps de démarrage réduit le

coefficient de frottement dans la région à friction mixte tandis que l'effet opposé est observé en régime hydrodynamique. En phase avec les données expérimentales, ces tendances sont prédites par le code numérique, mais seulement si le modèle d'énergie transitoire est appliqué.

## **Friction and wear analysis of journal bearings exposed to repeated start and stop cycles** **Analyse du frottement et de l'usure d'un palier lisse soumis à des cycles répétés de démarrage et d'arrêt**

Sander DE <sup>a</sup>

*a Virtual Vehicle Research Center, 8010 Graz, Austria.*

**Keywords:** Plain bearings, mixed lubrication regime, elasto-hydrodynamic simulation, measurement, validation.  
**Mots clés :** palier lisse, régime de lubrification mixte, simulation elasto-hydrodynamique, mesures, validation.

Journal bearings are typically designed to operate in pure hydrodynamic lubrication regime to ensure its lifetime. However, upon starting of an engine or turbine, the bearing has to overcome boundary and mixed lubrication regime before a hydrodynamic film has established which may completely separate the two contacting surfaces. This study focuses on the start and stop behaviour of journal bearings by measurement and simulation.

On a dedicated journal bearing test-rig, a large number of start and stop cycles are performed under static loading. The friction behaviour during several cycles is analysed and the development of breakaway torque over the number of cycles is studied. Furthermore, the measurement results are used to verify the mixed elasto-hydrodynamic simulation approach for journal bearings. Therefore, the components of the test-rig are modelled as deformable bodies in a multibody dynamic solver. The oil film is described by the averaged Reynolds equation according to Patir and Cheng. Metal-metal contact is considered by employing Greenwood and Tripp contact model. The input parameters for the contact model are derived from surface scans of the bearing shell and the shaft.

With the simulation model a transient start-stop simulation is performed. The journal rests in the bearing in the beginning of the simulation. When the journal starts to rotate the breakaway torque has to be overcome. Afterwards the bearing operates in mixed lubrication regime until the lift off speed is reached. Minimum oil film thickness and altitude angle are discussed during the whole start-stop cycle. Additionally, a detailed wear analysis is performed and the wear progress due to repeated starts and stops is investigated

Afin d'assurer une longue durée de vie, les paliers lisses sont conçus pour un fonctionnement en régime purement hydrodynamique. Cependant, lors du démarrage d'un moteur ou d'une turbine et avant l'établissement d'un film hydrodynamique qui sépare complètement les deux surfaces en contact, le palier doit pouvoir fonctionner en régimes de lubrification limite et mixte. Ce travail présente une étude numérique et expérimentale des phases d'arrêt et de démarrage des paliers lisses.

En utilisant un banc d'essais dédié aux paliers lisses, un grand nombre de cycles de démarrage et d'arrêt sont effectués sous charge statique. Le frottement du palier est suivi pendant plusieurs cycles ainsi que l'évolution avec le nombre de cycles du couple de démarrage. Les résultats expérimentaux sont ensuite utilisés pour vérifier un modèle numérique simulant la lubrification elato-hydrodynamique des paliers fonctionnant en régime mixte. Ainsi, les composants du banc d'essais sont modélisés comme des corps déformables par un solveur dynamique multi-corps. L'écoulement fluide est décrit par l'équation de Reynolds proposée par Patir et Cheng. Le contact sec est modélisé avec le modèle de Greenwood et Tripp. Les paramètres d'entrée pour le modèle de contact proviennent des surfométries réalisées aussi bien sur le coussinet du palier que sur l'arbre.

Des simulations des phases de démarrage/arrêt sont effectuées. L'arbre repose sur le coussinet au début de la simulation. Lorsque l'arbre commence à tourner, le couple de démarrage doit être surmonté. Ensuite, le palier fonctionne en régime de lubrification

mixte jusqu'à ce que la vitesse de soulèvement soit atteinte. L'épaisseur minimale du film ainsi que l'angle de calage sont des paramètres investigués durant tout le cycle de démarrage/arrêt. Par ailleurs, une analyse détaillée de l'usure est réalisée et la progression de l'usure avec les cycles de démarrage et arrêt est étudiée.

## **Analysis of bearing seizure of a PTFE central groove journal bearing during startup period Analyse du serrage d'un palier PTFE à rainure circonférentielle lors de la phase de démarrage**

Pap B <sup>a,b</sup>, Guillemont M <sup>b</sup>, Fillon M <sup>a</sup>, Geudry D <sup>b</sup>, Gédin P <sup>b</sup>, Drevon F <sup>b</sup>, Biadalla L <sup>b</sup> and Becquerelle S <sup>b</sup>

*a Institut Pprime, CNRS - Université de Poitiers – ISAE-ENSMA, D3-GMSC, SP2MI - Téléport 2, 11 Boulevard Marie et Pierre Curie, F86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex, FRANCE*

*b Safran Transmission Systems, 17, Boulevard Louis Seguin, 92707, Colombes, FRANCE*

**Keywords:** PTFE, central groove journal bearing, startup period, bearing seizure

**Mots clés :** PTFE, palier à rainure circonférentielle, phase de démarrage, serrage du palier

During start-up period, industrial journal bearings undergo highly transient phases. The thermal and hydrodynamic effects are varying with different time scales: the thermal equilibrium is reached slowly, while the hydrodynamic equilibrium is nearly instantaneous.

Usually, the journal bearing design is adapted to its steady-state operating conditions, and during the conception phase, the transient phenomena are rarely taken into account. If the bushing and the shaft materials are not the same, with different heat conductivity, the thermal expansion of the shaft might be faster than that of the bushing. This reduces the radial clearance between the bearing components and generates a higher shear in the lubricating fluid, which can lead to the bearing seizure, resulting in the deterioration of the journal bearing.

In our work, we present a case study of the seizure of a central groove journal bearing with a PTFE bushing and a steel shaft. A transient TEHD simulation is also presented in order to simulate the observed and measured phenomena.

Pendant la phase de démarrage, les paliers hydrodynamiques industriels subissent des périodes transitoires très marquées. Les effets thermiques et hydrodynamiques varient plus ou moins rapidement : l'équilibre thermique est atteint lentement, alors que l'équilibre hydrodynamique est quasi-instantané.

En général, le palier hydrodynamique est adapté à ses conditions de fonctionnement stationnaire, et pendant la phase de conception, les phénomènes transitoires sont rarement pris en compte. Si le matériau du coussinet et de l'axe ne sont pas les mêmes, avec des coefficients de conductivité thermique, la dilatation thermique de l'arbre peut être plus rapide que celle du coussinet. Ceci conduit à la réduction du jeu radial entre les composants du palier, et génère un cisaillement plus élevé dans le fluide lubrifiant et peut donc engendrer le serrage du palier, aboutissant à la détérioration de celui-ci.

Dans notre travail, nous présentons une étude de cas de serrage de palier à rainure circonférentielle, ayant un coussinet en PTFE et un arbre en acier. Une simulation TEHD en régime transitoire est également présentée, afin de simuler les phénomènes observés et mesurés expérimentalement.





## **2: Bearings failures**



## Toward Quantitative Analysis of Thrust Shoe Damage Analyse quantitative des dommages sur un pivot de patin de butée hydrodynamique

Branagan LA <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Pioneer Motor Bearing Company, Kings Mountain, North Carolina, USA.

**Keywords:** thrust bearings, damage, theoretical, tilting pad, operational guidance

**Mots clés :** Butées hydrodynamiques, dommages, théorie, patins oscillants, guide opérationnel

The evaluation of thrust bearing condition during a machine overhaul often includes the consideration of loss of material on the white metal or thrust collar face. Due to the ability of the thrust shoe to pivot, a quantitative evaluation is more difficult than for fixed geometry radial or thrust bearings. Available analysis software did not provide useful results for more than superficial damage. Building on an undamaged thrust shoe pressure profile and general guidance from similar studies with fixed geometry bearing damage, an initial algorithm is developed to predict the effect of damage, characterized by depth, circumferential width, circumferential location, radial width and radial location. The initial algorithm ignores the influence of pad tilt on its pivot and is extremely rapid. Studies on several, heavily loaded thrust shoe configurations show the influence of damage size and location on the residual shoe load capacity. The initial algorithm is then modified to account for pad tilt on a global basis and the previous studies are updated. The goal of this research is to develop quantitative tools with which to establish reasonable limits for surface damage on tilting pad thrust shoes.

L'évaluation des performances d'une butée lors d'une révision de la machine comprend souvent la prise en compte de la perte de matière sur le régule ou sur la face du grain tournant. En raison de la capacité de pivotement des patins de butée, une évaluation quantitative est plus difficile que pour les paliers et butées de géométrie fixe. Le logiciel d'analyse disponible n'a fourni de résultats utiles que pour des dégâts superficiels. S'appuyant sur un profil de pression obtenu sur un patin neuf et sur des conseils généraux d'études similaires d'endommagement des paliers à géométrie fixe, un algorithme initial est développé pour prédire l'effet des dommages caractérisé par la profondeur, la largeur et la position circonférentielles ainsi que la largeur et la position radiales. L'algorithme initial ignore l'influence de l'inclinaison du patin sur son pivot et est extrêmement rapide. Des études sur plusieurs configurations de pivots de patins fortement chargés montrent l'influence de la taille et de la position des dommages sur la capacité de charge du patin. L'algorithme initial est ensuite modifié pour tenir compte de l'inclinaison du patin par rapport à une base globale et les études précédentes sont mises à jour. L'objectif de cette recherche est de développer des outils quantitatifs permettant d'établir des limites raisonnables pour les endommagements de surface sur les pivots de patins.

## **Hydrodynamic film thickness measurements and CFD analysis identify the root causes of repetitive thrust bearing failure on 45 MW hydro generating unit at Hydro-Québec**

### **Des mesures d'épaisseur du film hydrodynamique et des analyses CFD ont permis d'identifier les causes de défaillances répétées d'un palier de butée sur un groupe turbo-alternateur de 45 MW à Hydro-Québec**

Gauvin P <sup>a</sup> and Huard P <sup>b</sup>

*a Hydro-Québec Production, Direction Expertise de Centrales, Appareillage de Production  
75 René-Lévesque Blvd West, Montréal, Québec, Canada H2Z 1A4*

*b Hydro-Québec Production, Direction Expertise de Centrales, Appareillage de Production  
75 René-Lévesque Blvd West, Montréal, Québec, Canada H2Z 1A4*

**Keywords:** Hydrodynamic, bearing, thrust, film, thickness.

**Mots clés :** Hydrodynamique, palier, butée, film, épaisseur.

High temperature level recorded on the thrust bearing of a 45 MW hydro generating unit was resulting in frequent production stoppage. In spite of improvements brought to the oil cooling system since the rehabilitation in 2008, the operator had to activate the bearing oil lift system to keep the temperature below acceptable limits. Primary root cause analysis first pointed to the design of the shoe that was centrally pivoted, not allowing the formation of a thick hydrodynamic film. A new design requiring minor machining of the soft metal layer resulted in a significant surface temperature reduction (about 15 deg. C), as predicted by a CFD model of the oil film. Proximity sensors were installed at each corner of the redesigned shoe to measure the film thickness and the bearing attitude. Signal analysis revealed a step of a magnitude close to the oil film thickness between the two halves of the rotating thrust block. This was the cause of another failure few hours since restarting the unit.

The lessons learnt through these measurements and analyses were carefully applied to the ultimate build. The unit now runs with a robust thrust bearing and even survived a significant cooling flow reduction event. This paper presents the CFD analysis results and the measurements acquired during these events.

Les très hautes températures mesurées sur un palier de butée d'une unité de production hydraulique de 45 MW ont engendré une fréquence importante de phases d'arrêt de production. Malgré les améliorations apportées sur le système de refroidissement de l'huile depuis la réadaptation de 2008, l'opérateur était régulièrement contraint d'activer le système de soulèvement en huile afin de conserver des températures inférieures aux limites acceptables. Les premières recherches se sont portées sur le design des patins pivotant en leur centre, ne permettant pas la formation d'un épais film hydrodynamique. Un nouveau design nécessitant peu d'usinage de la couche de métal mou entraîne une réduction significative de la température en surface (autour de 15°C), telle que prédit par le modèle CFD du film d'huile. Des capteurs de proximité ont été installés à chaque coin d'un patin pour mesurer l'épaisseur du film d'huile et le comportement du palier. Des signaux d'analyse ont révélé des amplitudes de vibrations proches de l'épaisseur du film d'huile entre les deux parties de la butée rotative. Ceci a été la cause d'une nouvelle défaillance quelques heures après le redémarrage de l'unité de production. Les enseignements retenus de ces mesures et de ces analyses ont été soigneusement appliquées lors des fabrications suivantes. L'unité fonctionne désormais avec un palier de butée robuste résistant très bien aux événements de réduction du débit de film d'huile. Ce papier présente les résultats de l'analyse CFD et les mesures acquises lors des différents événements mentionnés.



## **Nano-soldering pseudo-composite material to decrease engine bearing failure Matériau pseudo-composite à nano-soudure pour limiter les avaries des paliers de moteur**

Olaru P <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Metallurgy & SCO Expert Pool. CH-6006, Luzern, Switzerland

**Keywords:** nanosoldering, shape memory polymer, pseudo-composite, fatigue, bearing.

**Mots clés :** nano-soudure, polymère à mémoire de forme, pseudo-composite, fatigue, palier.

Engine bearings are small and relatively inexpensive components of internal combustion engines however, failure of an engine bearing commonly leads to serious reconditioning works of the engine including its disassembling, regrinding the crankshaft and replacing the bearings. The major type of engine bearing failure is fatigue. Fatigue of engine bearing materials is caused by running the bearing at a load above the fatigue limit. The requirements to engine bearing materials compromise between high mechanical strength (fatigue strength, hardness) and antifriction properties (seizure resistance, conformability, embedability), which are characteristic for soft materials. In order to meet such contradictory demands the bearing materials are designed to have composite structure. Particulate composite having a relatively hard matrix (copper, aluminium) with particles of a soft phase (tin, bismuth, lead, and carbon nano tube ). If the bearing loading exceeds its fatigue strength, fatigue cracks form in bearing material (engine bearing failure), spread to the back bearing layer and may result in flaking out of the material. Fatigue strength of engine bearing materials is evaluated in fatigue test rigs. Stock engines, street performance and circle track racing engines may use conventional aluminium-tin-silicon bi-metal or copper based tri-metal bearings depending on the load and crankshaft materials (AlSi bi-metal – for nodular cast iron shafts, tri-metal - for forged steel shafts). High strength tri-metal materials (e.g. sputter bearings) are recommended for applications with high bearing loading where conventional tri-metal material undergoes fatigue. Today, copper based bearing alloys are manufactured by either casting or sintering technology. We realized new technology nano-soldering pseudo-composite Unidirectional Carbon nFiber (UCnF) Reinforced Shape Memory Polymers(SMPs) Nanostrip Multilayers to improve bearing performances and decrease bearing failure/fatigue.

Les paliers de moteurs à combustion interne sont des composants petits et relativement peu coûteux. Cependant, la défaillance d'un palier de moteur entraîne généralement de sérieux travaux de reconditionnement, y compris son désassemblage, le ré-usinage de vilebrequin et le remplacement des paliers. Le principal type de défaillance est la fatigue des matériaux qui est causée par le fonctionnement de palier à une charge supérieure à la limite de fatigue. Les matériaux des paliers de moteurs doivent assurer le compromis entre une résistance mécanique élevée (résistance à la fatigue, dureté) et des propriétés anti-frottement (résistance au grippage, conformabilité, pouvoir d'inclusion) qui sont des caractéristiques des matériaux mous. Afin de répondre à de telles exigences contradictoires, les matériaux des paliers sont conçus pour avoir une structure composite : des composantes ayant une matrice relativement dure (cuivre, aluminium) avec des composantes mous (étain, bismuth, plomb et nano tube de carbone). Si le chargement dépasse la limite à la fatigue, des fissures se forment et se propagent, ce qui peut entraîner un décollement d'une des couches de matériaux. La résistance à la fatigue des matériaux des paliers du moteur est évaluée par des tests de fatigue. Les moteurs de véhicule conventionnel ainsi que les moteurs utilisés pour des courses sur circuit peuvent utiliser des paliers à base d'aluminium étain et silicone ou des tri-métalliques à base de cuivre, en fonction de la charge et des matériaux utilisés pour le vilebrequin (AlSi bi-metal - pour les arbres en fonte nodulaire, tri-métal - pour les arbres en acier forgé). Des

matériaux tri-métalliques à haute résistance sont recommandés pour les applications avec un chargement élevé, lorsque le matériau tri-métal conventionnel ne résiste pas à la fatigue. Aujourd'hui, les alliages à base de cuivre sont fabriqués soit par des techniques de coulée, soit par des technologies de frittage. Dans le but d'améliorer les performances et limiter le grippage et la fatigue des paliers, nous avons réalisé un nouveau polymère à nano-bandes multicouches et mémoire de forme renforcé par des pseudo-composites nano-soudés en fibre de carbone unidirectionnelle.

### **3: Bearings materials and water lubricated bearings**



## **New high strength white metal bearings applicable to higher performance machinery Nouveaux paliers en métal blanc de haute résistance applicables aux machines de haute performance**

Toda K <sup>a</sup>, Hara T <sup>a</sup>, Inoue E <sup>a</sup>, Nakano M <sup>a</sup> and Tanaka T <sup>a</sup>

*a Research & Development Dept. DAIDO METAL CO., LTD. Tendoh Shinden, Maehara, Inuyama, Aichi, 484-0061, JAPAN.*

**Keywords:** Plain bearings, new white metal, high load capacity, heat resistance, Cd free,

**Mot-clés:** Palier cylindrique, nouveau métal blanc, haute capacité de charge, résistance à la chaleur, sans Cd

For most of the turbomachinery, white metal alloy composed of Sn-Sb-Cu as the main elements is commonly used for their sliding bearings due to its excellent boundary lubrication behavior. According to making steady progress in the performance of the industrial machinery, it is a constant issue to improve the durability of the sliding bearings at higher speed. On the other hand in large bearings for low-speed marine diesel engines, the high-strength white metal including Cd and the like is currently adopted and it is needed in this field to improve the load carrying capability further.

In this research work, a new material has been developed that greatly improves the strength compared with conventional white metal alloy and maintains its superiority at high temperature. Replacing Cd, a controlled substance, with Bi and strengthening the alloy matrix by adding an appropriate amount of Ag, it has been achieved to provide the well-proportioned material of white metal alloy. The newly developed material has been optimized on the hardness at high temperature and improved the bearing performance under high speed and high load depending on its excellent high temperature properties.

Regarding the evaluation on the developed material, boundary lubrication friction characteristics under the marginally lubricated condition were tested with flat plate shape specimens, and the influence of deformed sliding surface simulating the effect of foreign particles was investigated. In addition, the seizure resistance and the load capacity of the bearing material under dynamic loading were evaluated using half test bearings, and the fatigue resistance of the new material resulted in to be improved by about 30% in comparison with the conventional high strength white metal. Furthermore, an abuse test was conducted under edge loading and in an abnormal state with a linear scratch on the sliding surface.

In these various performance tests, the new material showed excellent results and its superior bearing characteristics beyond those of conventional materials were confirmed.

In various industrial machinery that will enhance the performance progressively, it is expected that the newly developed material will be useful for the industry in the future.

Pour la plupart des turbomachines, un alliage de métal blanc, composé de Sn-Sb-Cu comme principaux éléments, est couramment utilisé dans les paliers lisses en raison de son excellent comportement en lubrification limite. Dans la recherche constante d'amélioration des performances des machines industrielles, l'augmentation de la durabilité des paliers lisses à haute vitesse est une problématique récurrente. D'autre part, le métal blanc haute résistance contenant du Cd et autres est utilisé dans les grands paliers de moteurs diesels marins à basse vitesse afin d'améliorer d'avantage les capacités de chargement de la machine. Dans ce travail de recherche a été développé un nouveau matériau considérablement plus résistant que les alliages de métal blanc conventionnels et ce, même à haute température. Cet alliage métallique bien proportionné a été obtenu en remplaçant le Cd, une substance contrôlée, avec du Bi ainsi qu'en renforçant la matrice de l'alliage par l'ajout d'une quantité adéquate de Ag. Ce nouveau matériau, optimisé pour sa dureté à température élevée, améliore les performances du palier à fort chargement et à haute vitesse grâce à ses excellentes propriétés à hautes températures. Concernant l'évaluation du matériau ainsi développé, les caractéristiques de lubrification limite, lors de conditions de

faible lubrification, ont été testées avec des plaques planes. L'influence de la déformation de la surface simulant l'effet de particules étrangères a aussi été étudiée. De plus, la résistance à l'usure et les capacités de charge du matériau sous chargement dynamique ont été évaluées en utilisant des demi-paliers de test. La résistance à la fatigue du nouveau matériau a ainsi été augmentée de 30% par rapport à un métal blanc haute résistance conventionnel. En outre, un test de tenue a été mené avec un chargement de bord dans un état anormal en présence d'une rayure sur la surface lubrifiée. Lors de ces différents tests de performance, le nouveau matériau a présenté d'excellents résultats. Ces tests ont confirmés que ses caractéristiques pour une utilisation dans des paliers sont supérieures à celles des matériaux conventionnels. De même que le nouveau métal blanc pour la génération à venir, on s'attend à ce que le matériau nouvellement développé étendra le champ d'application des diverses machines industrielles dont on verra leurs performances s'améliorer progressivement.

## **Development of lead free sliding bearing materials for high dynamic loads: Theory of the formation of the structure of sliding bearings based on monotectic alloys**

## **Développement de régule sans plomb pour les forts chargements dynamiques : Théorie de la formation des structures de paliers lisses à alliage monotectique.**

Gust E <sup>a</sup> and Gzovsky K <sup>a</sup>

*aResearch & Development ZOLLERN BHW Gleitlager GmbH & Co. KG, 38124 Braunschweig, Germany.*

**Keywords:** Monotectic, Al-Bi alloys, mixed lubrication, sliding bearings, fatigue strength

**Mots clés :** Monotectique, alliages Al-Bi, lubrification mixte, roulements à glissement, résistance à la fatigue

One of the important and well experienced groups of materials used for sliding bearings for high dynamic loads like internal combustion engines are monotectic alloys based on Cu-Pb systems and previously used Al-Pb-based alloys. Their wide practical application is associated with high reliability under the transient and mixed lubrication regime and particularly during the start-up and shut-off periods of such application. In addition, the alloys of these systems, in comparison with eutectic-type alloys Al-Sn, Sn-Sb-Cu have a significant higher fatigue strength. This is due to a more favorable distribution of the soft phase in the alloy structure. However, the alloys based on the systems Cu-Pb and Al-Pb have lead in their composition which is already illegal for automotive engine bearings in Europe. In addition there is a rapidly growing demand for lead free bearing solutions for large combustion engines, wind applications and hydraulic machines as well. Today's environmentally friendly alternatives are made of Al-Sn or are Sn-Sb-Cu - based bearings. In aluminum-tin alloys, tin segregates along the grain boundaries and weakens the cohesion of the grains, especially at elevated temperatures which finally leads to restricted load performance. As an alternative to the sliding bearing materials used today the monotectic Al-Bi-based alloys show very good lubrication and fatigue properties. However, these properties are achieved only with a homogeneous structure of the alloy. To achieve a homogeneous structure of such monotectic alloys, a theory and method of industrial production of alloys was developed and patented, a batch of experimental bearings was produced and their tests were carried out. Theory and results are presented in this paper.

L'un des groupes de matériaux les plus importants et étudiés que l'on utilise pour les paliers lisses soumis à de fortes charges comme dans les moteurs à combustion, sont des alliages monotectiques à base de Cu-Pb et des alliages à base de Al-Pb. Leur large champ d'application est associé à une grande fiabilité sous lubrification transitoire et mixte pendant les phases de démarrage et d'arrêt. De plus, ces d'alliages ont une bien meilleure résistance à la fatigue que les alliages de type eutectic comme Al-Sn et Sn-Sb-Cu. Ceci est dû à une meilleure distribution de la phase souple dans la structure de l'alliage. Cependant, les alliages à base de Cu-Pb et Al-Pb contiennent du plomb dans leur composition ; chose qui n'est déjà plus autorisée dans le secteur européen de l'automobile. De plus, il y a une forte augmentation de la demande de paliers sans plomb pour de grandes machines à combustion, éoliennes et machines hydrauliques. Les solutions alternatives respectueuses de l'environnement sont à base de Al-Sn ou de Sn-Sb-Cu. Dans les alliages d'aluminium-étain, l'étain se sépare le long des limites des grains et affaiblit la cohésion de ces grains, notamment pour des températures élevées ce qui réduit finalement les performances à des charge restreintes. Comme alternative aux matériaux de paliers lisses utilisés aujourd'hui, on peut utiliser les alliages monotectiques à base de Al-Bi car ils présentent de très bonnes propriétés de lubrification et de tenue à la fatigue. Cependant, ces propriétés ne sont obtenues qu'avec une structure d'alliage homogène. Pour obtenir la structure homogène de ces alliages monotectiques, une théorie et une méthode de production industrielle d'alliages ont été développées et brevetées. Un lot de paliers expérimentaux a été produit sur lequel ont été menés des tests. La théorie et les résultats sont présentés dans cet article.

**Polymer journal bearings behaviour research under limited lubrication and cooling conditions conducted on high torque test rig**  
**Recherche sur le comportement des paliers en polymère dans des conditions de lubrification et de refroidissement limitées sur un banc d'essai à couple élevé**

Barszczewska A<sup>a</sup> and Litwin W<sup>b</sup>

*a Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology, Gdansk University of Technology, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland, agnbarsz@pg.gda.pl.*

*b Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology, Gdansk University of Technology, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland, wlitwin@pg.gda.pl*

**Keywords:** Water-lubricated bearings, stern tube bearings, insufficient bearing lubrication, bearing failure  
**Mots clés :** Paliers lubrifiés à l'eau, paliers de tube d'étambot, sous-alimentation, défaillance du palier

Polymer journal bearings are frequently used as a water-lubricated bearings of small marine units' propeller shafts. Choice of these bearings is based on their simple construction and relatively low purchase and maintenance costs. Although properly designed and installed water lubricated bearings may well last for over a decade, rapid wear or failure of these bearings can be observed in practice. Some of these failures may be caused by lack or limited lubricant's flow through the bearing e.g. due to inlet chocking by some ocean debris. This leads to overheat especially in the bush material. Author's latest research indicates that certain bearings continue to work properly despite the absence of lubricant flow. This is due to the low motion resistance levels resulting from low friction. The paper presents follow-up tests of insufficient lubrication of the polymer bearings performed on the new built test rig, which enables to investigate real scale bearings with shaft diameter of 100 mm at high power propulsion (220kW). Thanks to this, the simulated conditions resemble those present on a small ship where the transmitted power is high enough to destroy the bearing completely with melted polymer bush flowing out from the housing.

Les paliers en polymère sont fréquemment utilisés comme paliers lubrifiés à l'eau des arbres d'hélices de petites unités marines. Le choix de ces paliers est basé sur leur construction simple, leur capacité de lubrification à l'eau de mer dans des boucles ouvertes ou fermées et leurs coûts d'achat et de maintenance relativement faibles. De plus, des paliers lubrifiés à l'eau, bien conçus et bien installés, peuvent durer plus d'une décennie. En pratique et en dépit de ces faits, on peut observer des cas d'usure rapide ou d'avaries de ces paliers. Certaines de ces défaillances peuvent être causées par un manque ou un écoulement de lubrifiant limité à travers le palier comme par exemple, en raison de l'obstruction de l'entrée par certains débris océaniques. Cela entraîne une surchauffe surtout dans le matériau du coussinet. Les dernières recherches des auteurs indiquent que certains paliers continuent de fonctionner correctement malgré l'absence d'écoulement de lubrifiant, qui entraîne un manque de refroidissement constant. Ceci est dû à la faible résistance au mouvement résultant d'un frottement très peu élevé. La chaleur générée dans la zone de frottement de ces paliers est suffisamment faible pour être dispersée dans l'environnement une fois que la température du palier augmente et se stabilise à un niveau acceptable. L'article présente des essais de suivi de la lubrification insuffisante des paliers en polymère. Le nouveau banc d'essai a été construit et les premiers tests ont été effectués. La plate-forme d'essai permet d'étudier des paliers à échelle réelle avec un diamètre d'arbre de 100 mm à une propulsion à haute puissance (220kW). Grâce à cela, les conditions simulées ressemblent à celles présentes sur un petit navire pour lequel la puissance transmise est suffisamment élevée pour détruire complètement le palier avec une douille en polymère fondue qui sort du boîtier.



## **4: Vibration, dynamic and bearing design**



## **Effect of dimple depth on the dynamic characteristics of fully textured journal bearings**

### **Effet de la profondeur des cavités sur les caractéristiques dynamiques des paliers entièrement texturés**

Taura H. <sup>a</sup>, Yamada H <sup>b</sup> and Kaneko S <sup>a</sup>

*a Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,  
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan*

*b <sup>2)</sup> Graduate School of Nagaoka University of Technology, Department of Energy and Environment Science,  
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata, 940-2188, Japan*

**Keywords:** Dynamic characteristics, Surface texturing, dimple depth, Stability, Reynolds number.

**Mots-clés :** Caractéristiques dynamiques, texturation de surface, profondeur de cavité, stabilité, nombre de Reynolds.

Recently, surface texturing has been applied to various mechanical elements with mating surfaces. This technique has also attracted attention in the field of the journal bearings, and many researchers have investigated the effect of surface texturing upon the static characteristics of these bearings. In the present study, we experimentally investigated the effects of the dimple depth on the dynamic characteristics of journal bearings with square dimples. The spring and damping coefficients of the oil film were measured under a relatively high Reynolds number based on the sinusoidal-excitation method for one conventional smooth surface bearing and two textured bearings with uniform square-dimple patterns on their full bearing surfaces, one with shallow dimples and the other with deep dimples, and then based on the spring and damping coefficients obtained, the linear stability-threshold shaft speed of the rigid rotor supported by textured bearings were calculated. These results were compared with a numerical model considering both the inertia effect and energy loss at the edges of the dimples, as proposed by authors. The experimental results showed that surface texturing with square dimples decreased the absolute value of the cross-coupled stiffness coefficients whereas the remaining dynamic coefficients were insignificantly changed by texturing in the present experiment. This reduction of the cross-coupled stiffness coefficients was attributed to the decrease of the tangential film force component, and it became more pronounced with increasing dimple depth. Furthermore, the linear stability-threshold shaft speed of the rigid rotor supported by the textured bearings can be improved by reducing the cross-coupled stiffness coefficients.

Récemment, la texturation de surface a été appliquée à de nombreux éléments de machines comprenant des surfaces en frottement. Cette technique a également attiré l'attention dans les paliers hydrodynamiques et de nombreux chercheurs ont investigué l'effet de la texturation de surface sur les caractéristiques statiques de ces paliers. Dans cette étude, nous avons étudié expérimentalement l'effet de la profondeur de textures de motif carré sur les caractéristiques dynamiques des paliers hydrodynamiques. Les coefficients de raideur et d'amortissement du film d'huile sous de grand nombre de Reynolds ont été mesurés dans le cas d'une excitation sinusoïdale pour un palier conventionnel lisse et deux paliers texturés avec des motifs carrés, de faible ou de grande profondeur, uniformément distribués sur toute la surface du coussinet. Sur la base de ces coefficients, la limite de stabilité linéaire dans le cas du rotor rigide a été calculée. Ces résultats ont été comparés à ceux d'un modèle numérique considérant les effets d'inertie et les pertes énergétiques aux bords des cavités, comme proposé par les auteurs. Les résultats expérimentaux ont montré que la texturation avec des motifs carrés conduit à une diminution du coefficient de raideur croisée sans affecter les autres coefficients dynamiques. Cette réduction du coefficient de raideur croisée a été attribuée à la diminution de la force tangentielle dans le film qui devient plus marquée lorsque la profondeur des textures augmente. De plus, la limite de stabilité linéaire dans le cas du rotor rigide peut être améliorée en réduisant le coefficient de raideur croisée.

## Case study about Oil Whirl on a gas compressor Etude d'un cas de Oil Whirl sur un compresseur à Gaz

Drygin S<sup>a</sup> and Péton N<sup>b</sup>

*a GE Oil&Gas – Digital Solutions, Presnenskaya naberezhnaya 10, Moscow (Russia).*

*b GE Oil&Gas – Digital Solutions, 14 rue de la Haltinière, Nantes (France)*

**Keywords:** bearing, oil whirl, shaft centreline plot, vibration, gas compressor.

**Mots clés :** coussinet, oil whirl, position moyenne de l'arbre, vibration, compresseur à gaz

This case study is designed to outline how the high vibration issue was successfully diagnosed, the root cause for the high vibration and finally how it was mitigated using capability of analysis shaft relative vibration data. The dominant frequency component of the extremely high vibration level – 346 um pp, higher than nominal bearing clearances, was a sub-synchronous component (0.37X component forward precession). Significant shaft centerline thermal influence was detected. Fluid Induce Instability (Whirl condition), was diagnosed for the Compressor DE bearing. As a first recommendation, bearing and seals inspection, piping support inspection and alignment check were recommended. Bearing, seals and piping supports were found in acceptable conditions. Alignment was corrected. Even after proper unit alignment the sub-synchronous component was still present. Bearing modernization was suggested to OEM: increase Stiffness (K), decrease lube oil velocity ratio (Lambda). Decrease L/D (Length/Diameter) bearing ratio by pads machining from both sides. Future tests after bearings modification confirmed Oil Whirl absence and normal unit operation at different load condition.

Cette étude de cas décrit comment un problème de vibrations élevées sur un compresseur a été diagnostiqué avec succès en utilisant les mesures de vibrations relatives d'arbre. La composante fréquentielle dominante du niveau de vibration extrêmement élevé (346 um pp), était une composante sous-synchrone (précession avant, 0,37X). La machine présente une influence thermique significative sur la mesure de la position moyenne de l'arbre. Une instabilité de type oil whirl condition a été diagnostiqué. En première instance, l'inspection des paliers et des garnitures, l'inspection de la tuyauterie et le contrôle de l'alignement ont été recommandés. Les coussinets, les garnitures et les supports de tuyauterie ont été trouvés dans des conditions acceptables. L'alignement a été corrigé. Même après un lignage correct de l'unité, la composante sous-synchrone était encore présente.

Différentes options pour modifier les coussinets ont été suggérées : augmentation de la rigidité (K), diminution de Lambda, diminution du rapport de palier L / D (longueur / diamètre) par usinage des patins. Des tests après modification des coussinets ont confirmé l'absence d'oil whirl et la possibilité d'opérer normalement l'unité à différentes conditions de charge.



**Implementation of a four-wedge bearing R4T on high-pressure turbines of large steam turbine generators up to 1100 MW / 3000 rpm**  
**Mise en œuvre d'un palier à 4 lobes R4T sur des turbines vapeur haute pression de turbo-alternateurs de 1100 MW tournant à 3000 tr/min**

Huster J<sup>a</sup>, Cooper P<sup>b</sup> and Demailly D<sup>a</sup>

*a Dept. of large Steam Turbines, GE Power AG, 5401 Baden, Brown Boveri Str. 7, Switzerland*

*b Dept. of large Steam Turbines, GE Power AG, GE Power AG, Willans Works 2NH, Newbold Rd, Rugby CV21, UK*

**Keywords:** Large steam turbine, R4T bearing type, sub-synchronous lateral shaft vibrations.

**Mots clés :** turbo-alternateurs avec turbines à vapeur, palier à géométrie fixe possédant 4 lobes, vibrations latérales d'arbres sous-synchrones.

Large steam turbine generators are operating with ultra-super critical live-steam conditions up to 300 bar and 620 degree Celsius. These turbines have two horizontal live-steam inlets at the high-pressure turbine (HPT), which could generate additional horizontal lateral forces on the relatively lightly loaded HPT front bearing and could lead to sub-synchronous lateral shaft vibrations.

For this reason, a 4-wedge fixed-arc bearing (R4T) in the diameter range from 180 mm to 225 mm was developed as a renaissance of the 4-wedge bearing types used in industrial steam turbines with high operating speeds up to 12 000 rpm and gear boxes applied in the 1960's.

The R4T bearing type with load on bottom wedge was optimized to get good damping behaviour for bearing load angle variations using the hydrodynamic bearing code ALP3T. Also, the bearing design was developed for the four lubricating oil inlets and for the application of modern 3D-CNC machining technology.

Already four R4T bearings were manufactured and successful implemented on four large steam turbine generator units (up to 1100 MW/3000 rpm) and showed good field experiences.

Les turbo-alternateurs avec turbines à vapeur de forte puissance opèrent dans des conditions de vapeur vive ultra supercritiques, allant jusque 300 bars et 620° Celsius. Ces turbines possèdent deux admissions vapeur placées sur un plan horizontal qui peuvent, dans certains cas, générer des efforts latéraux sur les paliers relativement peu chargés à l'avant des turbines haute pression, conduisant éventuellement à des vibrations latérales d'arbres sous-synchrones. Pour cette raison, un palier nommé R4T, a été développé pour des diamètres allant de 180 mm à 225 mm, en se basant sur les paliers à 4 lobes utilisés dans les années 1960 pour les turbines à vapeur industrielles, avec transmission par engrenage, allant jusqu'à 12000 tr/min. Le palier R4T, chargé sur le lobe inférieur, a été conçu à l'aide du code de calcul de paliers hydrodynamiques ALP3T pour obtenir un amortissement optimum sur la plage de variation d'angle de la charge appliquée. Il possède quatre entrées d'huile de lubrification et sa conception permet l'utilisation de la technologie d'usinage CNC 3D. Quatre paliers R4T ont déjà été produits et mis en oeuvre avec succès sur quatre turbo-alternateurs de 1100 MW tournant à 3000 tr/min, avec un retour d'expérience concluant.

**Design optimization of a turbocharger thrust bearing using a CFD-based THD computational approach**  
**Optimisation de la conception d'une butée de turbocompresseur en utilisant une approche numérique CFD en régime THD**

Charitopoulos AG<sup>a</sup> and Papadopoulos CI<sup>a</sup>

<sup>a</sup> School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens, Zografos, Greece

**Keywords:** THD, Thrust bearing, Turbocharger, Cavitation, Shear thinning, Optimization, CFD  
**Mots clés :** THD, butée, turbocompresseur, cavitation, fluidification, optimisation, CFD.

In a quest to reduce fuel consumption and emissions of combustion engines, friction losses from many different sources need to be reduced as much as possible. For modern designs of turbochargers, reduction of friction losses results in better efficiency and also contributes to a quicker transient response. The thrust bearing is one of the main contributors to the mechanical losses of a turbocharger. Therefore, it is crucial to optimize the design of the thrust bearing so that it has minimum friction losses while keeping sufficient thrust carrying capacity. One of the main challenges of turbocharger thrust bearing design, is that rotation speed is not fixed: the turbocharger may have a rotation speed which varies between 0 to as much as 250 kRPM. Moreover, the thrust bearing generates considerable heat, which changes the temperature of the oil film and its surroundings. In the present work, we optimized the design of the thrust bearing of a typical mid-size turbocharger.

Here, a pocket bearing concept has been considered. A CFD-based Thermohydrodynamic (THD) computational approach has been developed, taking into consideration heat dissipation, conjugate heat transfer throughout the bearing domain including the surrounding parts, as well as shear thinning and cavitation in the lubricant domain. An optimizer based on genetic algorithms has been coupled to the CFD solver, with the aim of identifying bearing designs with reduced friction losses. The resulting optimum pocket designs exhibit improved performance, in comparison to a reference pocket design, with geometric values selected from previous literature results. The present results indicate that (a) the pocket design can substantially contribute to further reducing the friction losses of a turbocharger, and (b) optimal design parameters of pocket bearings depend on the specific application (size, operating conditions), therefore detailed calculations should be performed to verify optimum performance.

Dans le but de réduire la consommation de carburant et les émissions des moteurs à combustion des automobiles, les pertes par friction provenant de différentes sources doivent être réduites autant que possible. Pour les conceptions modernes des turbocompresseurs, la réduction des pertes par frottement entraîne une meilleure efficacité et contribue également à une réponse transitoire plus rapide. La butée est l'un des principaux contributeurs aux pertes mécaniques d'un turbocompresseur. Par conséquent, il est essentiel d'optimiser la conception de la butée de sorte qu'elle présente des pertes minimales de frottement tout en conservant une capacité de charge axiale suffisante. L'un des principaux défis est que la vitesse de rotation n'est pas constante : le turbocompresseur peut avoir une vitesse de rotation qui varie entre 0 et 250 000 tr/min. En outre, la butée génère une chaleur considérable, qui modifie la température du film d'huile et de son environnement.

Dans le présent travail, nous avons optimisé la conception de la butée hydrodynamique d'un turbocompresseur de dimensions moyennes. Ainsi, nous avons considéré une butée composée de patins à poche. Une approche numérique Thermohydrodynamique (THD) basée sur des simulations CFD est développée, en tenant compte de la dissipation de chaleur et du transfert de chaleur dans tout le domaine de la butée, y compris les parties environnantes, ainsi que la fluidification et la cavitation dans le domaine du lubrifiant. Un optimiseur basé sur des algorithmes génétiques est couplé au solveur CFD, dans le but d'identifier les modèles de butée avec des pertes de frottement réduites. La conception de poche optimale montre des performances améliorées en comparaison à celles obtenues avec une configuration dont les caractéristiques géométriques sont issues des recherches antérieures. Les résultats indiquent (a) que la conception de la poche peut contribuer à réduire davantage les pertes de frottement d'un turbocompresseur, et (b) que les paramètres optimaux des poches dépendent des applications spécifiques (dimensions, conditions de fonctionnement), ayant pour conséquence la nécessité des calculs détaillés afin de vérifier la performance optimale.





## **5: Thermal effects under laminar and turbulent flow regime**



## Theoretical transient thermal studies on an eight-pad thrust bearing Etude théorique thermique en transitoire dans une butée à huit patins

Zeh C<sup>a</sup>, Hagemann T<sup>a</sup>, Kraft C<sup>a</sup> and Schwarze H<sup>a</sup>

*a, Institute of Tribology and Energy Conversion Machinery, Clausthal University of Technology, Leibnizstraße 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany*

**Keywords:** Thrust bearing, transient energy equation, temperature, dynamic loads, heating-up process

**Mots clé:** Butée, équation de l'énergie transitoire, température, charge dynamique, montée en température

This paper contains numerical studies on transient thermal effects focusing on heating-up processes during run-up procedure for an eight-pad thrust bearing under hydrodynamic conditions. Shock, pulsating and rising loads and their impact on temperature and fluid film are also investigated. These studies were performed using the bearing calculation tool COMBROS-A, enabling isothermal and non-isothermal calculations of bearing parameters for single and double acting thrust bearings. The code is extended by transient Reynolds and energy equation. Stationary experimental data available for the eight-pad thrust bearing is used to validate the calculation tool and for the subsequently conducted investigations. The implemented transient Reynolds equation is verified by approximative procedures based on linearization of fluid film pressure. In a first study on transient operating behavior, predictions on heating up processes for different constant loads and ramping rotational speeds were conducted. The impact of operating conditions on the duration of the heating up process is investigated in detail. Secondly, the influence of the transient energy equation on predicted fluid film thickness and temperature distribution is analyzed for different dynamic load characteristics to investigate and assess the different operating conditions predicted by transient and stationary calculations. Finally, a comparison between the temperature evolution in the fluid film and the pad and runner is carried out for several simulations to provide an insight on the time scales of the time delayed response of the solid to the heat generating fluid film.

Cet article contient des études numériques sur les effets thermiques transitoires et en particulier sur la montée en température durant les phases de démarrage pour une butée hydrodynamique à huit patins. Les chocs, les pulsations et les charges croissantes ainsi que leur impact sur la température et le film d'huile sont également étudiés. Ces études ont été effectuées à l'aide de l'outil de calcul de paliers COMBROS-A, permettant des calculs isothermes ou non isothermes des caractéristiques de paliers à butée simple ou double. Le code est étendu grâce aux équations de Reynolds et de l'énergie transitoires. Des données expérimentales stationnaires disponibles pour le palier de butée à huit patins sont utilisées pour valider l'outil de calcul et pour des recherches menées ultérieurement. L'équation transitoire de Reynolds implémentée est vérifiée par des procédures d'approximation basées sur la linéarisation de la pression du film fluide. Dans une première étude concernant le comportement en fonctionnement transitoire, des prédictions de montée en température pour différentes charges constantes et rampes de vitesses sont proposées. L'impact des conditions de fonctionnement sur la durée de la montée en température est étudié en détail. Dans un second temps, l'influence de la modélisation thermique transitoire sur l'épaisseur prévue du film fluide et la répartition de la température est analysée pour différentes caractéristiques de charge dynamique afin d'étudier et évaluer les différentes conditions de fonctionnement prédites par des calculs transitoires et stationnaires. Enfin, une comparaison entre l'évolution de la température dans le film fluide, le patin et le collet est effectuée pour plusieurs conditions afin de donner une idée de l'inertie thermique du solide par rapport au film fluide générant de la chaleur.

## Field tests on hydrodynamic and hybrid operation of a bi-directional thrust bearing of a pump-turbine

### Essais de terrain sur le fonctionnement hydrodynamique et hybride d'une butée hydrodynamique bidirectionnelle dans une turbine de pompe

Dąbrowski L<sup>a</sup> Wasilczuk M<sup>a</sup> and Wodtke M<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Gdansk University of Technology Faculty of Mechanical Engineering, 11/12 Narutowicza St. 80-233 Gdansk Poland.

**Keywords:** Pumped storage power plant, reversible machines, bi directional thrust bearing, transient conditions, field tests.

**Mots clés :** Usine de stockage à pompage, machines réversibles, butée bidirectionnelle, conditions transitoires, essais sur le terrain.

Pumped storage power plants are an important part of the power systems since they provide power supply in peaks of demand and also accumulate surplus of energy production in low demand periods of the day. In vertical shaft pump turbines operating in pumped storage power plants an important role is played by a thrust bearing. Because of bi-directional character of operation, thrust bearing tilting pads have to be supported symmetrically, which is known to be unfavourable from the point of view of their performance. Because of excessive thermo-elastic deformations thrust bearings of large diameters have to be carefully designed so as to minimise pad deformations. The above mentioned reasons make thrust bearings of pumped storage power plants a critical machine component, which has to be designed and operated with care. The research into fluid film thrust bearings has been quite extensive over the years, comprising theoretical studies of bearing properties with the use of more and more sophisticated calculation codes. Although the codes used for bearing calculations are quite sophisticated their accuracy is not clear, as there are almost no studies comparing theoretical and experimental results for large bearings. This is because of difficulty in gathering detailed test results for large bearings. That is why the authors hope that publishing results of extensive field tests of a large bearing of a pump-turbine they have done in a pumped storage power plant will be of interest to other researchers to compare theoretical predictions to measurement data.

Les centrales à stockage sont une partie importante des systèmes d'alimentation, car elles fournissent une alimentation électrique lors des pics de demande et accumulent également des excédents de production d'énergie dans les périodes de faible demande. Dans les pompes à arbre vertical des turbines des centrales à stockage les butées hydrodynamiques jouent un rôle important. En raison du caractère bidirectionnel du fonctionnement, les patins de butée doivent être supportés symétriquement, ce qui est connu pour être défavorable du point de vue de leur performance. En raison de déformations thermo-élastiques excessives, les butées de grands diamètres doivent être soigneusement conçues de manière à minimiser les déformations des patins. Les raisons mentionnées ci-dessus font de la butée des centrales électriques à stockage un composant critique de la machine, qui doit être conçu et utilisé avec précaution. La recherche sur butées à film fluide a été assez étendue au fil des années, comprenant des études théoriques sur leurs propriétés avec l'utilisation de codes de calcul de plus en plus sophistiqués. Bien que les codes utilisés pour le calcul de tels composants soient assez sophistiqués, leur précision n'est pas claire, car il n'y a pratiquement pas d'études comparant les résultats théoriques et expérimentaux pour les butées de grandes dimensions. Ceci est dû à la difficulté de recueillir des résultats de tests détaillés pour les grands paliers. C'est la raison pour laquelle les auteurs espèrent que la publication des résultats d'essais de terrain étendus sur une turbine à pompe de grande dimension qu'ils ont effectuée dans une centrale à stockage intéressera d'autres chercheurs pour comparer les prédictions théoriques aux données de mesure.

## **Improvement of the thrust bearing calculation considering the convectional heating within the space between the pads** **Calcul optimisé d'un palier de butée par la prise en compte des échanges convectifs dans l'espace inter-patins**

Chmielowiec-Jablczyk M <sup>a</sup>, Schubert A <sup>a</sup>, Kraft C <sup>b</sup>, Schwarze H <sup>b</sup>, Wodtke M <sup>c</sup> and Wasilczuk M <sup>c</sup>

*a GE Renewable Energy Hydro (Switzerland), Zentralstrasse 40, 5242 Birr, Switzerland.*

*b Institute of Tribology and Energy Conversion Machinery, TU Clausthal, Leibnizstr. 32, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany.*

*c Department of Mechanical Engineering, Gdansk University of Technology, Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk, Poland.*

**Keywords:** hydrodynamic bearing, thrust bearing calculation, thrust bearing test rig, thrust tilting pad.

**Mots clés :** Palier hydrodynamique, calcul de butée, banc d'essais de butée, butée à patins oscillants.

A modern thrust bearing calculation tool should consider not only the oil film between pad and rotating collar but also the space between the pads. The oil flow in the space has a significant influence on the oil film inlet temperature, the convectional cooling of pad and collar and should be included in the bearing calculation methods. The authors use a tool developed at University of Clausthal in cooperation with the research association for combustion engines (FVV) eV in Germany. The solutions of the Reynolds equation, the energy equation and the heat transfer equation are done iteratively using the Finite Volume Method by considering constant flow rate. Between many features of the tool one can mention for the oil film: JFO cavitation model, laminar / turbulent flow and centrifugal force.

This paper shows investigations done for tilting pad thrust bearings that are used in hydro-generating machines. The calculation results are compared with measurements done on a thrust bearing test rig at Gdansk University of Technology. The pad number of the original test rig (8) with an outer diameter of 180 mm was changed to 4, 6 and 9 of the same size. The influence of the distance between the pads is studied for loads up to 3 MPa, speeds up to 4000 rpm and different oil flows. Central and offset pad supports are tested. The calculated pad temperature field is adjusted to the measured values using different heat convection coefficients. After validation of the calculation tool the results of other conditions like high transient load are shown.

Un outil moderne de calcul de palier de butée doit considérer non seulement le film d'huile entre le patin porteur et le grain mobile, mais aussi l'espace inter-patins. Le débit d'huile dans l'espace inter-patin a une influence significative sur la température d'entrée du film d'huile, le refroidissement par convection du patin et du grain mobile doit être intégré dans les méthodes de calcul des paliers de butée. Les auteurs utilisent un outil développé à l'Université de Clausthal en coopération avec l'association de recherche pour les moteurs à combustion (FVV) eV en Allemagne. Les solutions de l'équation de Reynolds, l'équation d'énergie et l'équation de transfert de chaleur sont effectuées itérativement en utilisant la Méthode des volumes finis et en considérant le débit constant. Parmi les nombreuses caractéristiques de l'outil on peut citer pour le film d'huile: modèle de cavitation JFO, flux laminaire / turbulent et force centrifuge.

Cet article montre les recherches effectuées pour les paliers de butée équipés de patins oscillants qui sont utilisés dans les machines hydroélectriques. Les résultats du calcul sont comparés aux mesures effectuées sur un banc d'essai de paliers de butée à l'Université de Technologie de Gdansk. Le nombre de patin du banc original (8) d'un diamètre extérieur de 180 mm a été changé pour 4, 6 et 9 patins de même taille. L'influence de la distance entre les patins est étudiée pour des charges allant jusqu'à 3 MPa, des vitesses jusqu'à 4000 tr / min et des débits d'huile différents. Les appuis centrés et excentrés sont testés. Le champ de température du patin calculé est ajusté aux valeurs mesurées en utilisant différents coefficients de convection thermique. Après validation de l'outil de calcul, les résultats d'autres conditions telles que de fortes charges transitoires sont montrés.

## **THD analysis of a LEG TPJB considering both laminar and turbulent flow Analyse THD en régime laminaire et turbulent d'un palier à patins oscillants équipé d'une rainure en entrée (LEG)**

Croné P<sup>a</sup>, Almqvist A<sup>a</sup> and Larsson R<sup>a</sup>

*a Division of Machine Elements, Luleå University of Technology, Luleå, SE-971 87 Sweden.*

**Keywords:** Leading Edge Groove Lubrication, Tilting Pad Journal Bearing, Turbulence, Thermal Analysis, Power Loss.

**Mots clés :** Lubrification par rainure, paliers à patins oscillants, turbulence, analyse thermique, pertes de puissance.

The leading edge groove (LEG) tilting pad journal bearing (TPJB) offers a more direct approach of lubricating the bearing compared to the conventional method of supplying the lubricant through the pockets between the pads. This feature has been shown superior in reducing the temperature in thrust bearings but its performance in TPJBs is less clear; in fact, little is known about the actual mechanisms behind the lubricant mixing in the LEG and its consequences for the downstream temperature gradient along the pad. This paper thus focuses on modeling and simulating the complex three dimensional flow, which in turn governs the thermal effects and power losses, in a LEG TPJB where the actual geometry of the LEG is modeled in detail. Heat conduction into the pads and shaft is also included in the analysis. The results of this analysis are then compared to a TPJB without the additional LEG geometry where the effects of the LEG is instead modeled by an effective boundary condition for the inlet temperature. Special attention is given to the hypothesis that the LEG causes flow instabilities which then results in an early onset of turbulence. The non-isothermal flow over the LEG pads in the TPJB assembly over a wide range of operating speeds, using both laminar and turbulent models, is solved by using the finite element method. Moreover, the effects of inlet pressure- and temperature in the LEG are studied.

Les paliers à patin oscillant (TPJB) à rainure en entrée de patin (LEG pour Leading Edge Groove) permettent une approche plus directe de la lubrification des paliers par rapport aux méthodes conventionnelles d'apport de lubrifiant par des poches placées entre les patins. Cette technologie permet de réduire la température au sein des butées mais ses performances pour les paliers à patins oscillants sont moins évidentes. En fait, les mécanismes en jeu lors du mélange de lubrifiant dans la rainure et ses conséquences en aval sur le gradient de température vu par le patin sont peu connus. Cet article se concentre donc sur la modélisation et la simulation de l'écoulement tridimensionnel complexe qui gouverne à la fois les effets thermiques et les pertes de puissance dans un palier munie d'une rainure (LEG) à l'entrée et dont la géométrie réelle est modélisée en détail. La conduction thermique dans les patins et dans l'arbre sont également inclus dans l'analyse. Les résultats de cette analyse sont ensuite comparés à un palier à patins oscillants sans rainure LEG supplémentaire, où les effets de la LEG sont plutôt modélisés grâce à une condition au limite en température effective à l'entrée du patin. Une attention particulière est accordée à la possibilité de génération d'instabilité dans l'écoulement du fait de la présence de la rainure (LEG) menant ainsi à un départ précoce de la turbulence. La méthode des éléments finis a servi pour prédire l'écoulement non isotherme dans les rainures (LEG) des patins pour une large gamme de vitesses de rotation et en utilisant des modèles laminaires et turbulents. De plus, les effets de la pression et de la température en entrée du patin sont étudiés.

## **6: Dynamic behavior and controllable journal bearings**





## Controllable Sliding Bearings & Controllable Lubrication Principles – An Overview Paliers lisses contrôlables et principes de lubrification contrôlables – Vue d'ensemble

Santos IF <sup>a</sup>

*a Dept. of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark.*

**Keywords:** sliding bearings, actuators, holistic design, multi-physical modelling, mechatronics.

**Mots clés :** Paliers lisses, actionneurs, conception holistique, modélisation multi-physique, mécatronique

Hydrodynamic and aerodynamic lubrication regimes in its controllable form have been intensively investigated over the last two decades. With the aim of reducing friction and improving thermal, static and dynamic characteristics of sliding bearings different types of electro-mechanical actuators have been coupled to such bearings. Depending on *i*) the actuator type, *ii*) the actuation principle, i.e. hydraulic, pneumatic, piezoelectric or magnetic among others, and *iii*) how such an actuator is coupled to the sliding bearings, different regulation and control actions of fluid film pressure and lubricant flow can be obtained. The most common actions are: *a*) the control of the injection **pressure** to modify the fluid film pressure statically as well as dynamically; *b*) the adjustment of the angle and direction of injection **flow** (mostly passive action); *c*) the control of the sliding bearing **gap** and its preload via moveable and compliant sliding surfaces; and *d*) the control of the lubricant **viscosity**. All four parameters, i.e. pressure, flow (velocity profiles), gap and viscosity, are explicit parameters in the modified form of Reynolds' equations for active lubrication. In this framework the paper gives four original contributions to the state-of-art of sliding bearings and controllable lubrication: *I*) a comprehensive overview about the different types of controllable sliding bearings and principles used by several authors; *II*) how the sliding bearing properties – independent of the action principle – can be linked to and described by the modified Reynolds' equation for active lubrication; *III*) the correct use of the modified Reynolds's equation for active lubrication and a challenge to be overcome: the discharge coefficients; *IV*) a large amount of data obtained from a specially-designed test rig to aid the validation of multi-physical models for sliding bearings under several lubrication regimes. In this test rig all state-variables – pressures, flows, temperatures, gaps, resultant forces, journal lateral movements, journal angular velocity and angular positions, actuator positions – are monitored by sensors, facilitating the model validation process. The paper ends with some conclusive remarks about advantages and drawbacks of the different design solutions for controllable sliding bearings and the main challenges to be overcome towards industrial applications.

Les régimes de lubrification hydrodynamiques et aérodynamique sous leur forme contrôlable ont été intensément étudiés au cours des deux dernières décennies. Dans le but de réduire le frottement, l'amélioration des caractéristiques thermiques, statiques et dynamiques des paliers lisses, différents types d'actionneurs électromécaniques ont été couplés à ce type de paliers. Selon *i*) le type d'actionneur, *ii*) le principe d'actionnement, c'est-à-dire hydraulique, pneumatique, piézoélectrique ou magnétique, etc., et *iii*) la façon dont, un tel actionneur, est couplé aux paliers lisses, différentes mesures d'asservissement et actions de contrôle de la pression et d'une pellicule de fluide du flux de lubrifiant peuvent être obtenues. Les actions les plus courantes sont : *a*) le contrôle de la **pression** d'injection pour modifier la pression de la pellicule de fluide de manière statique et dynamique ; *B*) le réglage de l'angle et de la direction du **flux** d'injection (action passive) ; *C*) le contrôle du **jeu** du palier lisse et sa précontrainte par le biais de surfaces de glissement mobiles et compliantes; et *d*) le contrôle de la **viscosité** du lubrifiant. Les quatre paramètres, c'est-à-dire la pression, le flux (profils de vitesse), le jeu

et la viscosité, sont des paramètres explicites dans la forme modifiée des équations de Reynolds pour la lubrification active. Dans ce cadre, cet article présente quatre contributions originales à l'état de l'art sur les paliers lisses et la lubrification contrôlable : I) un aperçu complet des différents types de paliers et de principes coulissants contrôlables utilisés par les chercheurs; II) comment les propriétés des paliers lisses - indépendamment du principe d'actionnement - peuvent être liées et décrites par l'équation de Reynolds modifiée pour la lubrification active; III) l'utilisation adéquate de l'équation de Reynolds modifiée pour la lubrification active et le défi à surmonter soit les coefficients de décharge; IV) une quantité importante de données obtenues à partir d'une plate-forme d'essai spécialement conçue pour faciliter la validation de modèles multi-physiques pour les paliers lisses sous plusieurs régimes de lubrification. Dans cette plate-forme d'essai, toutes les variables d'état - les pressions, les débits, les températures, les espaces, les forces résultantes, les mouvements latéraux du palier, la vitesse angulaire et les positions angulaires du palier, les positions des actionneurs - sont surveillées par des capteurs, facilitant le processus de validation du modèle. L'article se termine par des remarques sur les avantages et les inconvénients des différentes solutions de conception pour les paliers lisses contrôlables et les principaux défis à surmonter pour les applications industrielles.

## Comparison of Reynolds Equation and CFD Simulations for Evaluation of a Grooved Journal Bearing with Injection

### Comparaison de l'équation de Reynolds et des simulations de CFD pour l'évaluation d'un palier hydrodynamique avec injection

Pierson KC <sup>a</sup>, Braun MJ <sup>a</sup> and Snyder TA <sup>a</sup>

*a Dept. of Mechanical Engineering, The University of Akron, Akron, OH, United States*

**Keywords:** Fluid Film Bearings, Cavitation, Injection, Reynolds Equation, Computational Fluid Dynamics  
**Mots clés :** Palier hydrodynamique, cavitation, injection, équation de Reynolds, logiciel CFD

A physics based, gaseous cavitation model by means of transient, variable properties Reynolds (RE), Rayleigh-Plesset-Scriven (RPS) and Energy equations has recently been proposed by the authors. The modified RPS equation calculates a time dependent void fraction which is used to determine the homogenous, two-phase fluid's density and viscosity for use in the RE while the energy equation determines the fluid's temperature dependent properties. The RPS equation is a form of the traditional Rayleigh-Plesset equation which includes surface dilatational effects. The surface dilatation term has previously been shown by the authors as an important term that accounts for oil tension (sub-cavitation pressures) in the divergent zone of journal bearings. The amount of tension present in the oil directly affects the stability of the journal bearing. The model has been developed further to investigate the behavior of journal bearings which are undergoing oil injection. The effect of oil injection on the performance of a grooved journal bearing will be evaluated using both the developed model as well as a full Navier-Stokes CFD solution. A comparison of the results will be presented including a grid independence study, evaluation of load carrying capacity and attitude angle for the various configurations studied, and a determination of the limits of the RE based model with regard to the depth of the grooves.

Un modèle de cavitation gazeuse, fonction de la nature originelle du phénomène, qui traite et combine les propriétés transitoires et variables de l'équation de Reynolds (RE), Rayleigh-Plesset-Scriven (RPS) et l'équation de l'énergie, a été récemment proposé par les auteurs. L'équation modifiée de RPS calcule une fraction de vide dépendante du temps qui est utilisée pour déterminer la densité et la viscosité homogènes du fluide biphasé à utiliser dans le RE, alors que l'équation d'énergie détermine les propriétés dépendantes de la température du fluide. L'équation de RPS qui comprend les effets dilatatoires de surface est une forme plus avancée de l'équation traditionnelle de Rayleigh-Plesset. Le terme de dilatation de la surface a déjà été démontré par les auteurs comme un terme important qui explique la tension de l'huile (pressions de sous-cavitation) dans la zone divergente d'un palier hydrodynamique. La quantité de tension présente dans l'huile affecte directement la stabilité d'un tel palier. Le modèle a été développé pour étudier le comportement des paliers hydrodynamique qui subissent une injection d'huile. L'effet de l'injection d'huile sur la performance d'un tel palier rainurée sera évalué en utilisant à la fois le modèle développé ainsi qu'une solution CFD Navier-Stokes complète. Une comparaison des résultats sera présentée, y compris une étude sur l'indépendance vis à vis du maillage, l'évaluation de la capacité de charge et l'angle d'attitude pour les différentes configurations étudiées et une détermination des limites du modèle basé sur RE en ce qui concerne la profondeur des rainures.

## **Real-time alignment and operation optimization of turbine shaft trains using adjustable bearings**

### **Alignement en temps réel et optimisation du fonctionnement des lignes d'arbres des turbines utilisant des paliers ajustables**

Chasalevris A<sup>a</sup> and Guignier G<sup>a</sup>

*a Industrial Steam Turbines, General Electric Co. (GE Oil&Gas), Newbold Road, Rugby, CV212NH, UK.*

**Keywords:** adjustable bearings; journal bearings; turbines; alignment  
**Mots clés :** suppression des vibrations, turbomachines, paliers ajustables

A study on the benefits of installing innovative journal bearings of adjustable geometry/properties in Steam/Gas turbines is presented in this paper. The adjustable bearing geometry is investigated in this work as a bearing function which can resolve issues in rotordynamic performance of industrial steam/gas turbines. The rotordynamic issues that the proposed bearing concept is proposed to resolve are given shortly as a) eccentric rotor whirling, b) non-optimum bearing loading, c) bearing housing/pedestal distortion, and d) casing structure distortion.

For each of the issues, the proposed journal bearing's functionality is presented in results of unbalance response through nonlinear transient analysis, and the functions of the proposed bearing are supposed to be activated during machine's operation. The principle of the adjustable bearing presented in this paper is the quasi-static displacement of the bearing pads to locate the journal centre in the desired position and to achieve the optimum performance regarding key parameters of power loss, temperature rise, and stability characteristics. The inner mechanism for applying the bearing pad displacement is not a topic of discussion in this paper as in the current work the adjustable bearing operation is studied on its fundamental operations.

The journal bearing model concerns nonlinear bearing impedance forces that are assigned in the rotor nodes after solving numerically the Reynolds equation for the two-partial arc journal bearing lubrication of finite length and the bearings' configuration is similar to this of industrial type bearings installed in such applications. The Reynolds equation is solved at every discrete time moment of the transient response of the rotor yielding linear or nonlinear impedance forces according to the characteristics of rotor motion. The bearing model enables the development of the oil-whirl/whip phenomenon if there is a trend towards instability (e.g. light loaded bearing, high speeds).

The rotor model is a multi-segment rotor configuration implemented through the Transient Transfer Matrix Method (TTMM). The case study presented in this paper concerns a steam turbine-generator shaft line of medium power (~100MW). The proposed journal bearing configuration has been provisionally patented from GE also regarding different operating principles than those presented in this paper.

Ce document présente une étude des bénéfices résultant de l'installation des paliers innovants avec une géométrie et propriétés ajustables pour des turbines à vapeur et à gaz. La géométrie ajustable du palier est analysée comme une fonction qui peut résoudre des problèmes de dynamique des rotors des turbines industrielles. Les problèmes de dynamique des rotors que ce concept de palier se propose de résoudre sont a) la précession excentrique du rotor, b) chargement non-optimal du palier, c) distorsion du support du palier et de son piédestal d) distorsion de la structure du palier.

Pour chaque point mentionné précédemment, la fonction du palier proposée est présentée comme un résultat de la réponse au balourd issu d'une analyse transitoire non-linéaire. Il est supposé que les fonctions du palier proposé sont activées durant le

fonctionnement de la machine. Le principe du palier ajustable présenté dans ce papier est le déplacement quasi-statique de ces patins pour positionner le centre de l'arbre dans la position souhaitée et pour arriver à des performances optimales en termes de perte de puissance, augmentation de la température et des caractéristiques de stabilité. Le mécanisme interne pour appliquer le déplacement des patins du palier ne fait pas l'objet de ce papier ; seul le fonctionnement fondamental du palier ajustable est étudié.

Le modèle du palier consiste des impédances non-linéaires qui sont injectées dans les nœuds du rotor après la résolution numérique de l'équation de Reynolds pour les deux patins de longueurs finie. L'équation de Reynolds est résolue à chaque pas de temps de la réponse transitoire du rotor et fournit des impédances linéaires et non-linéaires en fonction des caractéristiques du mouvement du rotor. Le modèle du rotor permet le développement du phénomène du fouettement si une tendance vers l'instabilité est détectée (par exemple un palier faiblement chargé, fortes vitesses de rotation). Le modèle de rotor est une configuration de rotor à segments multiples implémenté avec la méthode de matrice de transfert transitoire. Le cas étudié dans ce papier est une ligne d'arbre de turbine à vapeur et générateur de puissance moyenne (~100MW). La configuration de palier proposée a été provisoirement brevetée de GE aussi pour d'autres principes de fonctionnement que ceux proposés dans ce rapport.

**Characterization of high power turbomachinery tilting pad journal bearings: first results obtained on a novel test bench**  
**Caractérisation de paliers à patins oscillants à turbomachines à haute puissance: premiers résultats obtenus sur un nouveau banc d'essai**

Ciulli E <sup>a</sup>, Forte P <sup>a</sup>, Libraschi M <sup>b</sup>, Maestrale F <sup>c</sup>, Naldi L <sup>b</sup> and Nuti M <sup>c</sup>

*a Department of Civil and Industrial Engineering, University of Pisa, Pisa, Italy.*

*b GE Oil & Gas, Firenze, Italy.*

*c AM Testing srl, Pisa, Italy.*

**Keywords:** Tilting pad journal bearings, test rig, dynamic characterization, data acquisition, turbomachinery.  
**Mots clés :** Paliers à patins oscillants, banc d'essai, caractérisation dynamique, acquisition de données, turbomachines.

Tilting pad journal bearings are commonly used in turbomachinery for their stability at high rotational speeds. The behaviour of the bearings influences the dynamics of the rotor, so the determination of its stiffness and damping coefficients is of fundamental importance. This is often done experimentally by applying dynamic loads to the bearing and measuring the rotor/stator relative displacement.

A novel experimental apparatus has been realised, in the frame of a collaboration between the Department of Civil and Industrial Engineering of the University of Pisa, GE Oil&Gas and AM Testing, to test bearings with diameters from 150 to 300 mm, with peripheral speeds up to 150 m/s, static load up to 270 kN, single tone or multitone dynamic loads up to 30 kN and frequencies up to 350 Hz. It includes very complex mechanical, hydraulic, electrical and electronic systems and requires about 1 MW of total power. In this work the first results of the static and dynamic characterization of high performance tilting pad journal bearings are reported. Tests are typically conducted in steady conditions monitored by several sensors. Nonetheless some transient phenomena have been observed.

Les paliers à patins oscillants sont couramment utilisés dans les turbomachines pour leur stabilité à des vitesses de rotation élevées. Le comportement des paliers influe sur la dynamique du rotor, de sorte que la détermination de ses coefficients de rigidité et d'amortissement est d'une importance fondamentale. Cela se fait souvent expérimentalement en appliquant des charges dynamiques au palier et en mesurant le déplacement relatif du rotor/stator.

Un nouveau banc d'essai a été réalisé, dans le cadre d'une collaboration entre le Département d'Ingénierie civile et industrielle de l'Université de Pise, GE Oil & Gas et AM Testing, pour tester des paliers de diamètre de 150 à 300 mm, avec des vitesses périphériques allant jusqu'à 150 m/s, une charge statique jusqu'à 270 kN, des charges dynamiques, d'une ou plusieurs tonalités, allant jusqu'à 30 kN et des fréquences allant jusqu'à 350 Hz. Il comprend des systèmes mécaniques, hydrauliques, électriques et électroniques très complexes et nécessite environ 1 MW de puissance totale. Dans ce travail, les premiers résultats de la caractérisation statique et dynamique des paliers à haute performance sont rapportés. Les tests sont typiquement effectués dans des conditions stationnaires surveillées par plusieurs capteurs. Néanmoins, certains phénomènes transitoires ont été observés.

# Posters





**A numerical model of mechanical interaction of rough surfaces of the journal bearings  
of the piston engine**  
**Modèle numérique représentant les interactions mécaniques entre les surfaces  
rugueuses d'un palier lisse d'un moteur à piston**

Goritskiy Y <sup>a</sup>, Brazhnikova Y <sup>a</sup>, Gavrilov K <sup>b</sup> and Rozhdestvenskiy Y <sup>b</sup>

*a National Research University "MPEI", Moscow, Russia.*

*b South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.*

**Keywords:** Markov process, Elrod equation, surface asperities interaction.

**Mots clés :** procédé de Markov, équation d'Elrod, interaction entre les aspérités de surface.

The reliability of many machines and mechanisms is mainly determined by the reliability of friction pairs (in particular, journal bearings). So the journal bearings in the piston engine are mostly in the hydrodynamic lubrication regime, and, at high loading levels, in the transient and mixed lubrication regimes. The latter is important for the determination of the service life of the tribosystem as a whole. For this aim in this paper we describe, develop and apply approach proposed earlier to build models of the interaction of rough surfaces for one of the tasks of simulation of tribological systems of the piston engine. Suggested earlier models can estimate the area of contact, the friction force, coefficient of friction, wear, etc. However, this approach ignores the surfaces change and, consequently, contact and friction characteristics over the time. We described the general approach to building a model of interaction between rough surfaces, leading to the analysis of the Markov process. This method we applied for friction process, and for fatigue failure mode in which the surface element is destroyed after repeated contacts, the order of many millions. Given the initial data and the method of calculating the trajectory of movable elements on the lubricating layer taking into account rheological characteristics of lubricants, we determined the tribological parameters defining the resource of crankshaft bearings and the "piston-cylinder liner" tribosystem of the high-forced piston engine.

La fiabilité des machines et des mécaniques est déterminée par la fiabilité des couples de friction (en particulier pour les paliers). C'est pourquoi on considère la plus part du temps que les paliers des moteurs à piston se trouvent en régime de lubrification hydrodynamique, et pour des chargements élevés, dans des régimes transitoires et mixtes. Ces derniers sont importants pour la détermination de la durée de vie des systèmes tribologiques dans leur ensemble. Des précédents modèles permettent d'estimer les zones de contact, les forces de friction, les coefficients de friction, l'usure, etc... Cependant on ignore les modifications de surface et leurs conséquences, ainsi que l'évolution temporelle du contact et des caractéristiques de la friction. L'approche générale est décrite par la construction d'un modèle caractéristique des interactions entre les surfaces rugueuses, menant à l'analyse du procédé de Markov. C'est cette méthode que l'on applique pour les procédés de friction, et les modes de fissuration par fatigue dans lesquels l'élément de surface est détruit après des contacts répétés, de l'ordre de plusieurs millions. Après avoir fourni les données initiales et la méthode de calcul de la trajectoire des éléments de la couche de lubrifiant tout en tenant compte de ses caractéristiques rhéologiques, on détermine les paramètres tribologiques définissant les ressources des paliers de vilebrequin et du système tribologique de « la ligne cylindre – piston » d'un moteur à piston fortement contraint.

## Comparison of perturbed Reynolds equation and CFD models for the prediction of dynamic coefficients of sliding bearings

## Comparaison de l'équation de Reynolds perturbée et des modèles CFD pour la prédiction des coefficients dynamiques de paliers lisses

Snyder TA <sup>a</sup> and Braun MJ <sup>a</sup>

*a Dept of Mechanical Engineering, The University of Akron, Akron, OH, 44325-3903, USA.*

**Keywords:** hydrodynamic, slider, rotordynamic, Reynolds equation, CFD.

**Mots clés :** hydrodynamique, glissière, dynamique du rotor, équation de Reynolds, CFD.

The accuracy and utility of rotordynamic models of shafting systems are greatly affected by the accuracy of the constituent dynamic bearing models. Primarily, bearings are modeled as a summation of linearized mass, damping, and stiffness coefficients which are predicted from a perturbed Reynolds equation. In the present paper, an alternative method using CFD with moving boundaries is used to predict the dynamic coefficients of slider bearings and the results are compared with the more commonly employed perturbed Reynolds equation model. Linear slider and Rayleigh step bearing geometries are investigated and the results serve as precursors to similar investigations involving more complex journal bearing geometries. The perturbed Reynolds equation and CFD models are discussed in detail and comparisons made between the predicted dynamic coefficients under the context of the assumptions of vanishing film thickness and inertia associated with the Reynolds equation.

La précision et l'utilité des modèles dynamiques des systèmes d'arbres sont fortement affectés par la précision des modèles de paliers dynamiques constitutifs. Les paliers sont principalement modélisés comme l'addition des coefficients de masse, d'amortissement et de rigidité linéarisés et prédits à partir d'une équation perturbée de Reynolds. Dans le présent document, une méthode alternative utilisant la CFD avec des limites mobiles est utilisée pour prédire les coefficients dynamiques des paliers lisses et les résultats sont comparés avec le modèle d'équation de Reynolds perturbée le plus couramment utilisé. Les géométries de paliers lisses et de paliers Rayleigh sont étudiées et les résultats servent de point de départ à des recherches similaires impliquant des géométries de palier plus complexes. L'équation de Reynolds perturbée et les modèles CFD sont étudiés en détail et les comparaisons effectuées entre les coefficients dynamiques prédits sous les hypothèses de fuite d'huile et en présence de l'inertie dans l'équation de Reynolds.

**Effect of the sliding element surface texture on the oil film thickness under starved lubrication conditions**  
**Effet de la texture de surface de l'élément glissant sur l'épaisseur du film d'huile dans des conditions de sous-alimentation**

Galda L<sup>a</sup>, Sep J<sup>a</sup> and Prucnal S<sup>a</sup>

*a Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, Rzeszow University of Technology, Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Poland.*

**Keywords:** surface texture, film thickness, EHD, starved lubrication, non-conformal contact  
**Mots clés :** texture de surface, épaisseur de film, EHD, sous-alimentation, contact non conformé.

Under starved lubrication conditions such as at high load, low speed and lack of enough amount of lubricant the sliding pairs could suffer serious damages. One of the method improving the tribological performance of sliding elements in hard conditions is the appropriate surface creation that keep lubricating substance in cavities. This article presents the results obtained in experimental investigations of the oil film thickness in lubricated non-conformal contact with different surface topography of sliding element. The tests were conducted on ball-on-disc instrument equipped with colorimetric interferometry. The balls of diameter equaled to 19,05 mm were made from 100Cr6 steel. To provide hard operating conditions the glass disc rotated at small speeds in the range of 0,1 - 0,24 m/s. The tests were carried out at the loads of 20 N and 30 N. As a result, in most cases the greatest values of maximum oil film thickness were obtained when the surface of steel balls was characterized by high negative asymmetry with great valleys depth in comparison to peaks height. These surfaces comprised comparatively small number of peaks but the peaks curvature was big. At smaller load of 20 N and at higher speeds from the examined range the opposite results were achieved. The surface with huge peak density but of small peak's curvature was more effective in oil film creation than other variants of surface finish.

En régime de lubrification sous-alimentée dû par exemple à une charge élevée, une faible vitesse ou une quantité insuffisante de lubrifiant, les surfaces en vis-à-vis pourraient subir de graves dommages. L'une des méthodes d'amélioration des performances tribologique des solides en mouvement relatif dans des conditions difficiles est la création de surfaces appropriées qui maintiennent le lubrifiant dans les cavités. Cet article présente les résultats obtenus dans une étude expérimentale de l'épaisseur du film d'huile dans un contact non conforme lubrifié pour différentes topographies des surfaces solides. Les tests ont été effectués sur un instrument de type bille sur disque équipé d'un interféromètre colorimétrique. Les billes de diamètre égal à 19,05 mm ont été fabriquées en acier 100Cr6. Pour fournir des conditions de fonctionnement sévères, le disque de verre a tourné à de faibles vitesses dans la plage de 0,1 à 0,24 m/s. Les essais ont été effectués à des charges de 20 N et 30 N. En conséquence, dans la plupart des cas, les plus grandes valeurs de l'épaisseur maximale du film d'huile ont été obtenues lorsque la surface des billes en acier était caractérisée par une asymétrie négative élevée avec des profondeurs de vallées élevées en comparaison à la hauteur des pics. Ces surfaces comprenaient un nombre relativement petit de pics, mais dont la courbure était grande. À une plus faible charge, 20 N, et à des vitesses plus élevées, des résultats opposés ont été obtenus. La surface avec une grande densité de pic mais de courbure plus faible était plus efficace dans la création du film lubrifiant que d'autres variantes de finition de surface.

**Influence of speed on the static performance characteristics of hole entry worn hybrid conical journal bearing**  
**Influence de la vitesse sur les performances statiques d'un palier hybride conique usé à alimentation débouchante**

Phalle VM <sup>a</sup>, Pawar SR <sup>b</sup> and Khaske PG <sup>c</sup>

*a Dept. of Mechanical Engineering, VJTI, H.R. Mahajani Marg, Matunga, Mumbai 40019, India.*

*b Dept. of Mechanical Engineering, VJTI, H.R. Mahajani Marg, Matunga, Mumbai 40019, India.*

*c Air India Engineering Service Ltd, Mumbai, 400029, India.*

**Keywords:** hole entry, hybrid, worn, conical, capillary.

**Mots clés :** alimentation débouchante, hybride, usée, conique, capillaire.

An analytical approach is used to describe the effect of journal speed on the static performance characteristics of hole entry hybrid worn conical journal bearing compensated with capillary restrictor. The conical bearing consist of two symmetric rows of hole entry contour in the circumferential direction and it is assumed to be worn as result of friction occurring due to many start/stop operations during transient periods. The modified Reynolds equation governing the laminar flow of isoviscous incompressible lubricant in the clearance space of conical journal and bearing is solved by Finite Element Method. Numerically simulated results indicate that appreciable change in the static performance characteristics of worn hybrid conical journal bearing with variation in speed parameter as compared to unworn bearing of same configuration.

Une approche analytique est utilisée pour décrire l'effet de la vitesse de l'arbre sur les performances statiques d'un palier hybride conique usé à alimentation débouchante, compensé par une résistance hydraulique de type capillaire. Le palier conique est constitué de deux rangées symétriques d'alimentations débouchantes réparties dans la direction circonférentielle et on le suppose usé en raison du frottement dû aux nombreux démarrages/arrêts pendant les phases transitoires. L'équation de Reynolds modifiée, régissant l'écoulement laminaire du lubrifiant incompressible isovisqueux dans l'espace entre l'arbre conique et le coussinet, est résolue par la méthode des éléments finis. Les résultats des simulations numériques indiquent une variation appréciable des performances statiques du palier hybride conique avec la variation de la vitesse par rapport à un palier non usé de même configuration.

**Investigation of the effect of non-isothermal flow of non-Newtonian fluid in a thin layer  
on thermal state and working ability of the tribo-unit**  
**Etude de l'effet de l'écoulement non-isotherme d'un fluide non Newtonien dans une  
couche mince sur l'état thermique et les performances des tribo-éléments**

Zadorozhnaya E<sup>a</sup>, Levanov I<sup>a</sup> and Dorokhova O<sup>a</sup>

*a Dept of Motor Transport, South Ural State University, Lenin Prospect, 76, Chelyabinsk, Russia.*

**Keywords:** non-Newtonian fluid, thermal state, bearing, rotor.

**Mots-clés :** Fluide non-Newtonien, état thermique, coussinet, rotor

Most of the theoretical and experimental work on the study of friction units are based on the classical hydrodynamic theory of lubrication. This theory describes the behaviour of a Newtonian fluid in a thin lubricating layer that separates the interface surfaces. Typically, the viscosity of the lubricant is considered as a function of temperature and pressure. In recent decades, mathematical models and methods have been created that allow for taking into account individual features of the rheological behaviour of the lubricant. In addition, the determination of the thermal loading of the friction node always attracts the interest of researchers. At the same time, the use of the non-isothermal approach to solve the thermal problem is difficult because of the small thickness of the lubricant layer that separates the friction surfaces.

In the presented study, a system of equations for hydrodynamic problems that take into account the processes of heat exchange between a lubricant and a solid is given. To model non-Newtonian properties of modern lubricants, a rheological model of the lubricant was used. This model reflects the dependence of viscosity on temperature, pressure, a shear rate. To solve the Reynolds equation, a multigrid method was used.

A series of comparative calculations for evaluating the performance of hydrodynamic units, taking into account their thermal loading, is performed on the example of calculating the dynamics of a flexible asymmetric rotor, as well as heavy-loaded bearings of internal combustion engines.

The results are the temperature distributions in the lubricating layer, as well as the pressure distribution. The results of the calculations showed that the temperature difference between the rotor bearings was 15-18 degrees. The results of theoretical studies have shown good agreement with the results of experimental studies.

This work has been carried out within financial support of Russian Foundation for Basic Research (project № 16-08-01020\16).

La plupart des travaux théoriques et expérimentaux sur les systèmes tribologiques sont basés sur la théorie classique de la lubrification. Elle repose sur des hypothèses simples notamment que le fluide est Newtonien. On trouve depuis plusieurs décennies des modèles rhéologiques plus avancés. D'autre part, la résolution du problème thermique dans les systèmes lubrifiés reste délicate en raison de la faible épaisseur du film.

Dans la présente étude, un système d'équations est proposé pour résoudre les problèmes hydrodynamiques tout en tenant compte des échanges de chaleur avec les solides dans le cas d'un lubrifiant dont la viscosité est dépendant de la température, de la pression et du taux de cisaillement. Un modèle numérique prenant en compte le film et les deux solides est présenté. Une approche multi-grilles est notamment utilisée. Une série d'exemples est réalisée pour évaluer les performances de divers systèmes tribologiques. Des écarts de température de 15 à 18 degrés sont observés dans certains cas et sont en accord avec les études expérimentales.

Ce travail a été réalisé grâce au soutien de la Fondation Russe pour la Recherche Fondamentale (projet N°16-08-01020\16)

## **Misalignment cases on machine trains of CC Power Plants** **Influence du mauvais lignage sur la signature vibratoire pour des machines installées dans des cycles combinés**

Miniello F <sup>a</sup> and Péton N <sup>b</sup>

*a GE Oil&Gas – Digital Solutions, c/ Valcarcel 26, Madrid (Spain)*

*b GE Oil&Gas – Digital Solutions, 14 rue de la Haltinière, Nantes (France)*

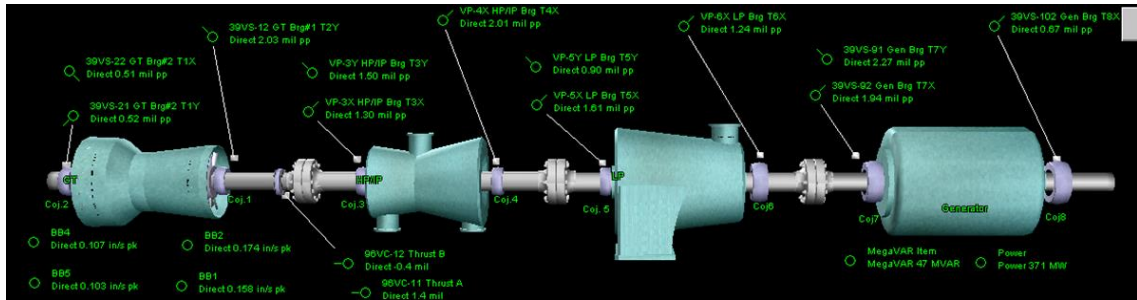
**Keywords:** orbit, shaft centreline plot, preload, bearing, coupling.

**Mots clés :** Orbite, position moyenne de l'arbre, pre-charge, coussinet, accouplement.

This paper discusses the vibration patterns found in some real cases of machinery external misalignment belonging to the Power Generation industry. It does not address internal alignment, which is alignment of the stationary components (diaphragms, oil deflectors, etc.) relative to the rotors. Misalignment can have different effects on different machine types. Some machines may not display any symptoms of misalignment until there is fatigue or failure of the coupling. This is because the flex planes might be absorbing the energy and taking the articulation of misalignment. In other cases, the shafts and bearings may absorb or reflect the results of misalignment in the forms of vibration and bearing temperatures changes. High vibration is not always an indicator of misalignment. The machines analyzed are the turbine-generator trains found in the Combined Cycles Power plants; the article focuses on the single shaft, 8 bearings machine train layout, which is composed by a Heavy Duty Gas turbine, two bodies of Steam turbine (HP/IP and LP) and the Electric Generator. The alignment of this type of machine trains can be difficult due to the big dimensions and masses involved, moreover the relative position of the machines is strongly affected by the significant thermal growth which typically occurs on steam and gas turbines. These main features, together with the fact that rigid couplings are used, introduce a high level of complexity which must be faced by diagnostic engineers in order to define the alignment condition of this type of units – the cases presented in this article are meant to be a good example of this complexity.

Cet article traite de l'influence d'un mauvais lignage extérieur sur la signature vibratoire pour certains cas réels de machines appartenant à l'industrie de la production d'électricité. Il ne traite pas de l'alignement interne, qui est l'alignement des composants stationnaires (diaphragmes, déflecteurs d'huile, etc.) par rapport aux rotors. Le désalignement peut avoir des effets différents sur différents types de machines. Certaines machines peuvent ne pas afficher de symptômes de désalignement jusqu'à ce qu'il y ait de la fatigue ou une défaillance de l'accouplement. En effet les plans flexibles d'accouplement peuvent dans certains cas absorber l'énergie et accepter un certain degré de désalignement. Dans d'autres cas le mauvais lignage peut se refléter par un changement de la réponse vibratoire et des températures des paliers. Les vibrations élevées ne sont pas toujours un indicateur de désalignement. Les machines analysées dans cet article sont des turbines-générateurs installées dans des centrales électriques à cycles combinés ; donc des machines avec 8 paliers, composée d'une turbine à gaz, de deux corps de turbine à vapeur (HP / IP et LP) et d'un alternateur. L'alignement de ce type de machine peut être difficile en raison des grandes dimensions et des masses impliquées. De plus, la position relative des machines est fortement affectée par la forte dilatation thermique qui se produit généralement sur les turbines à vapeur et à gaz. Ces caractéristiques particulières, associées à un accouplement rigide, présentent un haut niveau de complexité auquel doivent être confrontés les ingénieurs de diagnostic afin de

définir l'état d'alignement de ce type d'unités -les cas présentés dans cet article sont significatifs de la complexités du diagnostic.





## **Non-invasive in-situ measurement of lubricant film thickness and viscosity for hydrodynamic bearings**

### **Mesure non-invasive in situ de l'épaisseur du film de lubrifiant et de la viscosité pour des paliers hydrodynamiques**

Brunskill H<sup>a</sup>, Schirru M<sup>a</sup> and Dwyer-Joyce R<sup>a</sup>

a. *Leonardo Centre for Tribology, Dept Mechanical Engineering, University of Sheffield, Mappin Street, Sheffield, S1 3JD*

**Keywords:** Lubricant Film Thickness, Viscosity, Experimental, In-Situ, Sensor

**Mots clés :** Épaisseur du film de lubrifiant, Viscosité, Expérimental, In-Situ, Capteur

Active ultrasonics is a powerful tool for the in-situ characterisation of tribological interfaces. Unlike extremely popular optical techniques, ultrasonics do not require the use of transparent materials. By mounting a piezoelectric sensor on the back face of a component and reflecting a high frequency soundwave from the interface of interest, it is possible to measure the lubricant film thickness and viscosity of the fluid at that interface in real time. The measurements can be performed at up to 100kHz meaning that the approach can characterise transient behaviour. The measurements are of particular interest in bearing systems which experience large variations in film pressure and temperature. These variations are often difficult to predict but are evident in the ultrasonic results. This work initially aims to introduce the concept of active ultrasonics and the application to interfacial measurement. Details are then given about how lubricant film and viscosity information is extracted from the reflected ultrasonic signals. To demonstrate the measurement techniques, three case studies are given using journal and thrust bearing test rigs operating with varying parameters including lubricant type and surface texture.

La technologie de mesure basée sur des ultrasons actifs est un outil puissant pour la caractérisation in situ des interfaces tribologiques. Contrairement aux techniques optiques extrêmement populaires, les ultrasons ne nécessitent pas l'utilisation de matériaux transparents. En montant un capteur piézoélectrique sur la face arrière d'un composant, la réflexion d'une onde sonore de haute fréquence par l'interface analysée, rend possible la mesure en temps réel de l'épaisseur du film de lubrifiant et de la viscosité du fluide. Les mesures peuvent être effectuées jusqu'à 100 kHz, ce qui signifie que l'approche peut caractériser un comportement transitoire. Les mesures sont particulièrement intéressantes dans les paliers et les butées qui présentent de grandes variations de la pression et de la température du film. Ces variations sont souvent difficiles à prédire, mais sont évidentes dans les résultats obtenus par ultrasons. Le premier but de cet article est d'introduire le concept de la mesure basée sur des ultrasons actifs et son application à la mesure des interfaces. Des détails sont ensuite donnés sur la façon dont l'information sur le film lubrifiant et la viscosité sont extraites des signaux des ultrasons réfléchis. Pour démontrer les techniques de mesure, trois études de cas sont présentées. Ils utilisent des bancs d'essais pour de paliers et des butées avec des fonctionnant de fonctionnement variables, y compris le type de lubrifiant et la texture de surface.



## Non-stationary oil film force database for hydrodynamic journal bearing Technique des bases de données des forces non-stationnaires exercées par le film d'huile d'un palier lisse hydrodynamique.

Wang W<sup>a</sup> and Zhang KC<sup>a</sup>

*a Dept of Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Yanchang Road 149, Shanghai China*

**Keywords:** Oil film force, Hydrodynamic Lubrication, Journal Bearing, Rotordynamics, Non-stationary  
**Mots clés :** Force exercée par le film d'huile, lubrification hydrodynamique, palier lisse, dynamique du rotor, non-stationnarité

For modern rotor systems supported by fluid film bearings, the traditional linear theory, which use linear stiffness and damping coefficients to represent the dynamic characteristics of the bearing, is not capable of explaining some phenomenon and hard to simulate the rotor-bearing system under large vibration. Thus, the nonlinear stability study of the rotor-bearing system have attracted more attentions, and a convenient way is to calculate the locus of the shaft center and then check the stability of the system. The locus is obtained by the numerical time-integration of the shaft center motion, in which the transient oil film force is needed at each step of the integration.

There are two ways to obtain the nonlinear oil film force, the first is direct solving of the transient Reynolds equation and the second is using approximate methods such as the short bearing theory or some nonlinear dynamic model using higher-order stiffness and damping coefficients. In order to obtain the locus, the time-integration should be performed over a sufficiently long time span. Thousands of integration steps are needed at least and the transient Reynolds equation is repeatedly solved for the same number of times. Obviously, the direct solving method is highly time-consuming, and very inconvenient. Though the approximate method is fast, its accuracy is very questionable, and its application is of limited value.

In this paper, the technique of non-stationary oil film force database for hydrodynamic bearing is introduced, It is proved that the database technique not only had practically the same accuracy as the direct solving method, but also shortened the computation time dramatically. The easiness of "assembling" the individual bush forces from the database to form the bearing force, makes it very convenient to evaluate the stability of various types of journal bearings. In this paper, the simple Jeffcot rotor model as shown in Fig.1 was used to demonstrate the potential application of this technique on nonlinear rotordynamics. Fig.2 is the unbalance loci of the shaft center supported by different type of bearings with different speed.

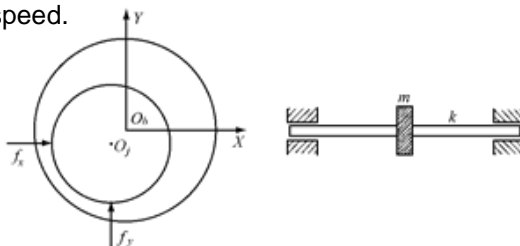


Fig.1 Jeffcot rotor supported on fluid film bearings

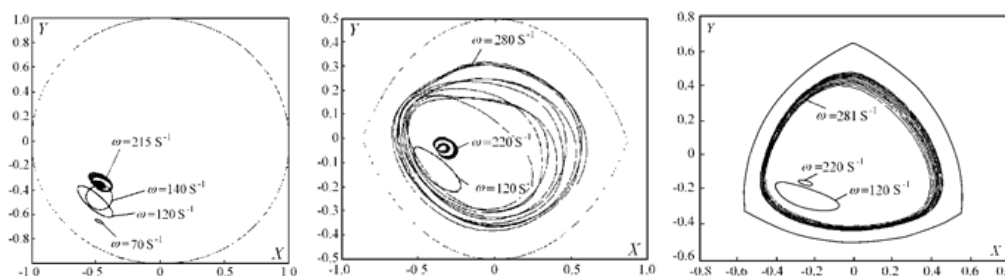


Fig.2 Unbalance loci of circular, elliptical and three-lobe bearings

Pour les systèmes de rotor modernes supportés par le film d'huile généré au palier, la théorie linéaire traditionnelle, qui utilise des coefficients de rigidité et d'amortissement linéaires pour représenter les caractéristiques dynamiques du palier, s'avère insuffisante pour expliquer certains phénomènes et a parfois des difficultés à simuler le comportement de l'ensemble rotor-palier lorsque celui-ci est soumis à de larges vibrations. De fait, les études de stabilités non-linéaires des systèmes rotor-palier ont attiré de nombreuses attentions, et il a été convenu que le moyen pratique pour vérifier la stabilité du système est simplement de déterminer la position du centre de l'arbre. Le calcul de cette position est effectué par une intégration temporelle du mouvement du centre de l'arbre, dans laquelle la force transitoire exercée par le film d'huile est nécessaire à chaque pas de l'intégration. Il y a deux façons d'obtenir cette force non-linéaire, la première est une résolution directe de l'équation de Reynolds en transitoire et la seconde est d'utiliser des méthodes d'approximation telle que la théorie des paliers courts ou quelques modèles de dynamique non-linéaire utilisant des coefficients de rigidité et d'amortissement d'ordre élevé. Afin d'obtenir la position du centre, la réalisation de l'intégration temporelle peut être assez couteuse et demander une discrétisation en temps assez importante. Au minimum des centaines de pas de temps sont nécessaires au cours de chacun desquels l'équation transitoire de Reynolds est résolue. De toute évidence, la résolution directe est très couteuse en temps et contraignante. Bien que les méthodes d'approximation soit plus rapide, sa justesse est très questionnable et son application est limitée à certaines valeurs. Dans ce papier, on introduit la technique des bases de données des forces non-stationnaires exercées par le film d'huile dans les paliers hydrodynamiques. Il est prouvé que la technique des bases de données fournit des résultats de qualité équivalente à la résolution directe dans des temps de calcul drastiquement plus courts. La facilité avec laquelle est réalisé « l'assemblage » des forces issues des bases de données qui forment ensemble la force au palier, rend très simple l'évaluation de la stabilité de différents types de palier lisses hydrodynamiques. Dans ce papier, le simple modèle de rotor de Jeffcot montré en Fig.1 a été utilisé pour démontrer les potentielles applications de cette technique sur l'étude des rotors dynamiques non-linéaires. On voit sur la Fig.2 le balourd supporté par les différents types de paliers étudiés à différentes vitesse de rotation de l'arbre.

## Predicting lifetime of IC engine crankshaft connecting rod bearings at the design stage Prédiction de la durée de vie des paliers de vilebrequin du moteur IC au stade de la conception

Levanov I<sup>a</sup>, Zadorozhnaya E<sup>a</sup>, Lashmanov V<sup>a</sup> and Eschiganov M<sup>a</sup>

*a Dept of Motor Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.*

**Keywords:** Conrod bearings, crankshaft, lifetime, internal combustion engine, theoretical wear diagram.  
**Mots clés :** Paliers de bielles et de vilebrequin, durée de vie, moteur à combustion interne, diagramme d'usure théorique.

The purpose of the article is to predict the service life of the connecting rod bearing of an internal combustion engine. The technique of calculation is based on lubrication hydrodynamic theory and the molecular-mechanical theory of friction and wear fatigue theory. It includes several stages.

The first is to set the load conditions of the engine (engine speed, torque, operating time). The second is the definition of the forces acting on the connecting rod bearing. The third is the calculation of the hydromechanical characteristics of the bearing such as the minimum thickness of the lubricating layer, the maximum hydrodynamic pressure, the loss of power for friction, and others. The rheological model of oil takes into account the dependence of viscosity on shear rate. The fourth is the definition of the duration of the zone where liquid friction is violated.

The fifth is the calculation of bearing wear for 720 degrees of crankshaft rotation (loading cycle) for each mode. Then the wear is recalculated taking into account the duration of each mode of operation. The characteristics of the crank journal and bearing are taken into account. The diagram of the wear of the connecting rod bearing is based on the simulation results.

The results of the calculation with known data on the wear of connecting rod bearings are compared.

Le but de l'article est de prévoir la durée de vie des paliers de bielle d'un moteur à combustion interne. La technique de calcul est basée sur la théorie de la lubrification hydrodynamique et sur la théorie de la mécanique moléculaire de la résistance au frottement et à la résistance à l'usure. Il comprend plusieurs étapes.

La première consiste à choisir les conditions de charge du moteur (vitesse du moteur, couple, temps de fonctionnement). La seconde est la définition des forces agissant sur le palier de bielle. La troisième est le calcul des paramètres de fonctionnement du palier tels que l'épaisseur minimale du film fluide, la pression hydrodynamique maximale, la perte de puissance par frottement. Le modèle rhéologique de l'huile tient compte de la dépendance de la viscosité sur le taux de cisaillement. La quatrième étape est la caractérisation des zones lubrifiées et des zones où il se produit une rupture de film.

Enfin la cinquième étape est le calcul de l'usure des paliers lors d'une rotation de 720 degrés du vilebrequin (cycle complet de charge). L'usure est ensuite recalculée en tenant compte de la durée de chaque mode de fonctionnement. Les caractéristiques du tourillon et du palier de manivelle sont prises en compte. Le diagramme de l'usure du palier de la bielle est basé sur les résultats de la simulation.

Puis les résultats sur l'usure des paliers, obtenus avec différentes données, sont comparés.

## Probe track run-out identification and compensation to benefit machinery diagnostics Identifier l'influence sur le diagnostic du défaut de piste associé aux mesures de vibrations relatives d'arbre

Barrowclough P.<sup>a</sup> and Péton N.<sup>b</sup>

*a GE Oil&Gas – Digital Solutions, Skelmersdale, Lancashire, WN8 9UU (UK)*

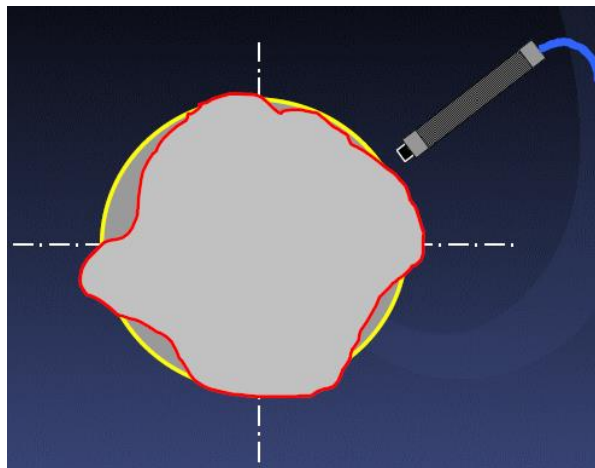
*b GE Oil&Gas – Digital Solutions, 14 rue de la Haltinière, Nantes (France)*

**Keywords:** run-out, proximity probes, vibration, shaft centreline plot, bearing

**Mots clés :** défaut de piste, capteur de déplacement, vibration, position relative de l'arbre, coussinet.

Probe track run-out is a common issue associated with vibration measurements using proximity type transducers. Probe track run-out can be mechanical or electrical in nature. Typical causes of probe track run-out are indicated and methods of how to identify and quantify the amount using various vibration data plot types are included. Probe track run-out on proximity probe vibration signals can affect machinery protection systems, leading to nuisance alarms and unwanted trips. Run-out can also influence the machinery diagnostic perspective whereby machinery problems can be more difficult to interpret. Examples are included on how, in some instances, the vibration data plots can be compensated to remove the effects of run-out, enhancing the machinery diagnostic capability

L'élimination du défaut de piste est un problème commun associé aux mesures de vibrations relatives d'arbre utilisant des transducteurs de type proximité. Ce défaut de piste peut être mécanique ou électrique. Dans cet articles les causes typiques de ce défaut de piste (runout) y sont indiquées ainsi que des méthodes permettant de l'identifier et de le quantifier en utilisant divers types de graphique de présentation des données de vibration. La présence de ce défaut de piste sur les signaux de vibration de la sonde de proximité peut affecter les systèmes de protection des machines, entraînant des alarmes nuisibles et des mesures faussées de déplacements d'arbre. Ce défaut de piste peut également influencer le diagnostic vibratoire de la machine, de sorte que les données vibratoires des machines peuvent être plus difficiles à interpréter. Des exemples sont inclus permettant de comprendre comment, dans certains cas, les graphiques des données de vibration peuvent être compensés pour éliminer l'influence de ce défaut de piste et donc améliorer la capacité de diagnostic de la machine.



## **Substantiation of reduction of mixed lubrication effect in hybrid bearings based on the load separation principle**

### **Arguments scientifiques pour la réduction des effets de la lubrification mixte dans les paliers hybrides fonctionnant selon le principe de séparation de la charge**

Polyakov R<sup>a</sup>, Fetisov A<sup>a</sup> and Savin L<sup>a</sup>

*a Orel State University named after I.S. Turgenev, Naugorskoe shosse, 29, Russia.*

**Keywords:** rolling-element bearing, fluid-film bearing, hybrid bearing, friction torque, Stribeck curve.

**Mots clés :** roulement, palier fluide, palier hybride, couple de frottement, courbe de Stribeck.

Reliability of rotating machinery is determined to a considerable degree by the bearing units. For several applications the requirements in rotational speed, bearing load and maximal vibration level are so extreme that neither rolling-element bearings (REB) nor fluid-film bearings (FFB) could provide necessary operating characteristics during all regimes of operation. Hybrid bearings, which are a combination of rolling-element and fluid-film bearings, can improve performance characteristics and reliability of the rotorbearing systems.

A hybrid bearing, where a rolling-element bearing and a fluid-film bearing are positioned parallel to the vector of external load (PLEX), has the following advantages compared to a single bearing, whether rolling-element or fluid-film one: increase of lifetime expectancy, load capacity increase, friction reduction, thermal regime enhancement, increase of stiffness and damping properties.

The present paper presents the results of theoretical and numerical research of friction characteristics of PLEX in mixed sliding and rolling lubrication regime. The conditions of minimum friction effect occurrence have been substantiated, and rational relations between characteristics of hybrid REB and FFB needed for provision of such effect have been experimentally proven. Finally, the paper presents recommendations regarding design of such hybrid bearings for heavily loaded bearing nodes of rolling mills.

La fiabilité des machines tournantes dépend en grande partie des organes de guidage. Parfois, les exigences concernant la vitesse rotative, la charge appliquée aux paliers ainsi que le niveau maximum de vibrations sont tellement élevées que ni les roulements, ni les paliers fluides ne peuvent pas correctement assurer le fonctionnement sur toute la plage d'exploitation. Les paliers hybrides, qui sont une combinaison d'un roulement et d'un palier fluide, peuvent améliorer les performances ainsi que la fiabilité des lignes d'arbre.

Un palier hybride dans lequel un roulement et un palier fluide sont situés parallèlement au vecteur de la charge extérieure (SMSC – support mixte à séparation de charges) aurait plusieurs avantages par rapport au positionnement isolé d'un roulement ou d'un palier fluide : augmentation de la durée de vie, augmentation de la portance, réduction du frottement, meilleur comportement thermique, augmentation de la rigidité et de l'amortissement.

L'article présente des résultats de recherche théoriques et expérimentaux concernant les caractéristiques de frottement d'un SMSC fonctionnant en régime mixte de lubrification (roulement et glissement). Les auteurs documentent les conditions dans lesquelles apparaît l'effet d'un frottement minimal ; ils montrent aussi une corrélation rationnelle entre les caractéristiques des roulements et des paliers fluides nécessaire pour produire cet effet. Ils donnent également des recommandations concernant la conception de ce type de paliers hybrides pour des situations fortement chargées rencontrées dans les laminoirs.

# Author Index

Almqvist Andreas, 38

Barrowclough Paul, 60

Barszczewska Agnieszka, 24

Becquerelle Samuel, 11

Biadalla L, 11

Branagan Lyle, 15

Braun Minel Jack, 43, 50

Brazhnikova Yulia, 49

Charitopoulos Anastassios, 30

Chasalevris Athanasios, 44

Chmielowiec-Jablczyk Monika, 37

Ciulli Enrico, 46

Cooper Paul, 29

Croné Philip, 38

Dabrowski Leszek, 36

Demailly David, 29

Devron F, 11

Dohnal Fadi, 4, 5

Dorokhova Olga, 53

Drygin Sergey, 28

Eschiganov Michail, 59

Fetisov Alexander, 61

Fillon Michel, 11

Forte Paola, 46

Galda Lidia, 51

Gauvin Pierre, 16

Gavrilov Konstantin, 49

Gédin Patrice, 11

Geudry D, 11

Goritskiy Yurii, 49

Guignier G, 44

Guillemont Maxence, 11

Gust Edgar, 23

Gzovskyy K, 23

Hagemann Thomas, 7, 35

Hara Takeyoshi, 21

Huard P, 16

Huster Josef, 29

Inoue Eisaku, 21

Kaneko Saotru, 27

Khaske Prashant, 52

Kraft Christian, 37

Larsson Roland, 38

Lashmanov Vladimir, 59

Levanov Igor, 53, 59

Libraschi Mirko, 46

Litwin Wojciech, 24

Maestrone Francesco, 46

Miniello Francesco, 54

Nakano Masahiro, 21

Naldi Lorenzo, 46

Neubauer Piotr, 3

Nuti Matteo, 46

Olaru Paul, 17

Pap Bálint, 11

Papadopoulos Christos, 30

Pawar Sanjay, 52

Péton Nicolas, 28, 54, 60

Phalle Vikas, 52

Pierson Kristopher, 43

Polyakov Roman, 61

Pröß Maximilian, 7,

Prucnal Slawomir, 51

Rozhdestvenskiy Juriy, 49

Sander David, 9

Santos Ilmar, 41

Savin Leonid, 61  
Schubert Andreas, 3, 37  
Schwarze Hubert, 7, 35, 37  
Sep Jaroslaw, 51  
Snyder Troy, 43, 50  
  
Tanaka Tadashi, 21  
Taura Hiroo, 27  
Toda Kazuaki, 21

Wang Wen, 57  
Wasilczuk Michal, 36, 37  
Wodtke Michal, 36, 37  
  
Yamada Hiyoyuki, 27  
Yu John, 10  
  
Zadorozhnaya Elena, 53, 59  
Zeh Christopher, 35  
Zemella Philipp, 7  
Zhang K C, 57





## List of participants

Name	Surname	Country	Company
<b>Adiletta</b>	Giovanni	ITALIE	Università di Napoli Federico II
<b>Andersen</b>	Lasse	DANEMARK	Grundfos
<b>Andriani</b>	Luciano	SUISSE	Kugler Bimetal SA
<b>Arghir</b>	Mihai	FRANCE	Université de Poitiers
<b>Bailey</b>	Alex	ROYAUME-UNI	Michell Bearings
<b>Baillon</b>	Pierre-Yves	FRANCE	EDF SEPTEN
<b>Barszczewska</b>	Agnieszka	POLOGNE	Gdansk University of Technology
<b>Bayard</b>	Raphael	FRANCE	zollern tlc
<b>BAYÓN</b>	RAQUEL	ESPAGNE	IK4-TEKNIKER
<b>Beaurain</b>	Jérôme	FRANCE	EDF R&D
<b>BENCHEKROUN</b>	Omar	FRANCE	Université de Poitiers/CNES
<b>BHAAKTA</b>	MANBENDRA	INDE	OMEGA RENK BEARINGS PVT. LTD.
<b>BLOUIN</b>	Antoinette	FRANCE	Université
<b>Bonneau</b>	Olivier	FRANCE	Université de Poitiers
<b>Bottenschein</b>	Michael	ALLEMAGNE	Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG
<b>Bouayach</b>	Youssef	FRANCE	Université de Poitiers
<b>BOUYER</b>	Jean	FRANCE	Institut Pprime
<b>Branagan</b>	Lyle	ETATS-UNIS	Pioneer Motor Bearing Company
<b>Bruce</b>	Paul	ROYAUME-UNI	Michell Bearings
<b>Brunetière</b>	Noël	FRANCE	CNRS
<b>Brunskill</b>	Henry	ROYAUME-UNI	University of Sheffield / Peak to Peak Measurement Solutions
<b>Cataño Castro</b>	Jose Miguel	ESPAGNE	Es
<b>Charitopoulos</b>	Anastassios	GRECE	NTUA
<b>Chasalevris</b>	Athanasios	ROYAUME-UNI	General Electric Co.
<b>CIULLI</b>	ENRICO	ITALIE	UNIVERSITY OF PISA
<b>COCHAIN</b>	JEREMY	FRANCE	Pprimee
<b>CRISTEA</b>	Alex-Florian	FRANCE	Tecnitas SAS Bureau Veritas Marine & Offshore
<b>Croné</b>	Philip	SUEDE	Luleå University of Technology
<b>Cruz</b>	Ramiro	FRANCE	CRUZ EUROPE
<b>Dadouche</b>	Azzedine	CANADA	National Research Council Canada
<b>DAHITE</b>	Samia	FRANCE	Université de Poitiers
<b>Darbois</b>	Matthieu	FRANCE	Université de Poitiers
<b>DE BOM</b>	Olivier	FRANCE	YOU industrie
<b>de carpentier</b>	bertrand	FRANCE	RENK FRANCE
<b>DENIS</b>	Sébastien	FRANCE	Danfoss Commercial Compressors
<b>DEPOERS</b>	BERTRAND	FRANCE	JEUMONT ELECTRIC
<b>Dobrica</b>	Mihai B.	FRANCE	BD Kompressor
<b>Eling</b>	R.P.T.	PAYS-BAS	Mitsubishi Turbocharger
<b>Fatu</b>	Aurelian	FRANCE	Université de Poitiers
<b>Fillon</b>	Maryse	FRANCE	ENSMA
<b>Fillon</b>	Michel	FRANCE	Institut Pprime
<b>FIORE</b>	Giuseppe	FRANCE	CNES
<b>FORTE</b>	PAOLA	ITALIE	UNIVERSITY OF PISA
<b>Francisco</b>	Brito	PORTUGAL	Universidade do Minho
<b>Frene</b>	jean	FRANCE	université de Poitiers

## List of participants

Name	Surname	Country	Company
<b>Galda</b>	Lidia	POLOGNE	Rzeszow University of Technology
<b>gauvin</b>	pierre	CANADA	hydro-québec
<b>Gavrilov</b>	Konstantin	RUSSIA	South Ural State University
<b>Giovani</b>	Rafaël	FRANCE	Institut Pprime
<b>Grann</b>	Helge	DANEMARK	Grundfos Holding a/s
<b>GUILLEMONT</b>	Maxence	FRANCE	Safran Transmission Systems
<b>Gust</b>	Edgar	ALLEMAGNE	ZOLLERN BHW Gleitlager GmbH&Co.KG
<b>Gutwein</b>	Erik	ALLEMAGNE	Main-Metall Tribologie GmbH
<b>Guy</b>	Victor	FRANCE	EDF R&D
<b>Gzovskyy</b>	Kostyantyn	ALLEMAGNE	ZOLLERN BHW Gleitlager GmbH & Co. KG
<b>HAJJAM</b>	Mohamed	FRANCE	Pprime
<b>Hamy</b>	Pierre	FRANCE	Flender Graffenstaden
<b>Hassini</b>	Amine	FRANCE	EDF R&D
<b>HENRY</b>	Yann	FRANCE	Université de Poitiers
<b>Hentschke</b>	Christoph	ALLEMAGNE	Renk AG
<b>Hölscher</b>	Norbert	ALLEMAGNE	Renk AG
<b>Huster</b>	Josef	SUISSE	GE Power Switzerland
<b>Inoue</b>	Eisaku	JAPON	DAIDO METAL CO. LTD.
<b>Jarray</b>	Mohamed	FRANCE	université de Poitiers
<b>jendoubi</b>	hiba	FRANCE	université de poitiers
<b>jolly</b>	pascal	FRANCE	Institut Pprime
<b>Kerynck</b>	Charles	FRANCE	Fives FCB
<b>Kexi</b>	Zhang	CHINE	Shanghai University
<b>Kuczowskiak</b>	Antoine	FRANCE	EDF R&D
<b>KUNIK</b>	Serguei	FRANCE	PPRIME
<b>kwangik</b>	na	JAPON	Daidometal
<b>Lang</b>	Klaus J.	ALLEMAGNE	EagleBurgmann Germany GmbH & Co. KG
<b>Langmayr</b>	Daniel	AUTRICHE	Andritz Hydro
<b>LE ROUZIC</b>	Julian	FRANCE	Université de Poitiers
<b>LEBIGRE</b>	Olivier	FRANCE	DRESSER-RAND/SIEMENS
<b>Levanov</b>	Igor	RUSSIA	South Ural State University
<b>Ligier</b>	Jean-louis	SUISSE	HEIG-VD
<b>Livermore-Hardy</b>	Richard	ROYAUME-UNI	Waukesha Bearings
<b>Ludivion</b>	Nadiège	FRANCE	UNM
<b>masuda</b>	tasuku	JAPON	Mitsubishi Heavy Industries
<b>Meck</b>	Klaus-Dieter	ROYAUME-UNI	John Crane
<b>Medhioub</b>	Morched	ALLEMAGNE	Kingsbury GmbH
<b>michalski</b>	eric	FRANCE	FMDP
<b>Mogenier</b>	Guillaume	FRANCE	EDF SEPTEN
<b>MORELL</b>	Jean-François	FRANCE	SAMR SAS
<b>NA</b>	TAE HO	KOREA	TURBOLINK
<b>Narten</b>	Michael	ALLEMAGNE	RENK AG
<b>NEGRI</b>	Claudio	ITALIE	OMT Torino SpA
<b>OLARU</b>	Paul	ROUMANIE	SETEC
<b>Paillard</b>	Hubert	FRANCE	G.E. Power

## List of participants

Name	Surname	Country	Company
PAP	Balint	FRANCE	Université de Poitiers
Papadopoulos	Christos	GRECE	National Technical University of Athens
PELLEVOISIN	Lionel	FRANCE	SAMR SAS
Pennacino	Antoine	FRANCE	Safran Transmission Systems
Perrier	Michel	CANADA	Hydro-Québec
Pethybridge	Guy	ROYAUME-UNI	Waukesha Bearings
PETON	NICOLAS	FRANCE	Baker Hughes a GE Company
Pierson	Kristopher	ETATS-UNIS	University of Akron
PINEDO	BIHOTZ	ESPAGNE	IK4-TEKNIKER
Plantegenet	Thibaud	FRANCE	Institut Pprime / Université de Poitiers
Polyakov	Roman	RUSSIA	Orel State University named after I.S. Turgenev
Polyakova	Marina	RUSSIA	Orel State University named after I.S. Turgenev
Prakash	Vishal	INDE	DVB Technologies
Pröiß	Maximilian	ALLEMAGNE	Institute for Tribology and Energy Conversion Machinery
PROTIN	Nicolas	FRANCE	YOU industrie
Raimundo	Jean-Pierre	FRANCE	CRUZ EUROPE
REGNAUT	Sébastien	FRANCE	AREVA NP
Roberto	Miguens Segade	ESPAGNE	Estanos y Soldaduras Senra slu
ROLLING	Jean Jacques	FRANCE	CRUZ EUROPE
ROMERO	Eric	FRANCE	Fives FCB
Sander	David	AUTRICHE	Kompetenzzentrum - Das virtuelle Fahrzeug ForschungsgmbH
Santos	Ilmar F.	DANEMARK	Technical University of Denmark
SAUTEREAU	THIERRY	FRANCE	EDF CIH
Schubert	Andreas	SUISSE	GE Renewable Energy
Schüler	Eckhard	ALLEMAGNE	John Crane
Schwarze	Hubert	ALLEMAGNE	Institute for Tribology
SOUCHET	DOMINIQUE	FRANCE	Université
Taura	Hiroo	JAPON	Nagaoka University of Technology
Tesini	Pietro	PAYS-BAS	SKF BV
Toda	Kazuaki	JAPON	DAIDO METAL CO. LTD
TOMOV	Petar	FRANCE	SAFRAN Aircraft Engines
Visser	Roel	PAYS-BAS	Mitsubishi Turbocharger
VO	Anh	FRANCE	Institut Pprime
Wang	Wen	CHINE	Shanghai University
Wasilczuk	Michał	POLOGNE	Gdansk University of Technology
Wodtke	Michał	POLOGNE	Gdansk University of Technology
Zadorozhnaya	Elena	RUSSIA	South Ural State University
ZAIDI	Hamid	FRANCE	Université de Poitiers
Zeh	Christopher	ALLEMAGNE	Institute of Tribology and Energy Conversion Machinery
zhu	jie	CHINE	Hunan SUND Industrial and Technological Co. LTD.
zou	ying	CHINE	Hunan SUND Industrial and Technological Co. LTD.