



ANALYSE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES ARBRES DE PROPULSION NAVALE : APPROCHE EXPERIMENTALE

R. FARGERÉ⁽¹⁾, F. BRIDIER⁽¹⁾, B. HABERT⁽¹⁾, A. DOMBEK⁽¹⁾, P.-E. CIVEL⁽¹⁾, B. DIEU⁽¹⁾,
Y. CADORET⁽²⁾, B. BOU-SAÏD⁽³⁾, S. FOUVRY⁽⁴⁾, V. DOCQUET⁽⁵⁾

(1) Naval Group, (2) Direction Générale de l'Armement
(3) LaMCoS INSA Lyon, (4) LTDS EC Lyon, (5) LMS Ecole Polytechnique

17 Octobre 2023

© Naval Group SA property, 2023, all rights reserved.

Corporate Sensitivity
PUBLIC

SOMMAIRE

1. Problématique et contexte
2. Comportement d'ensemble – banc ligne d'arbres
3. Comportement local des paliers immergés – banc de frottement et usure
4. Comportement d'assemblage fretté – banc de flexion rotative

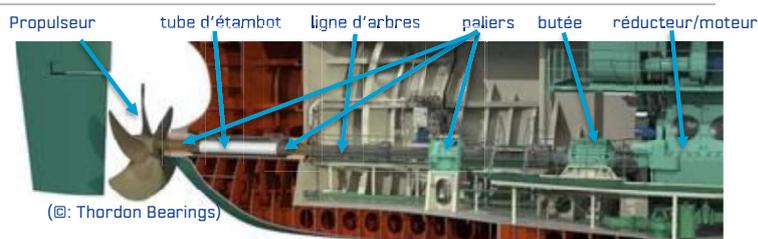
1. Problématique et contexte

2. Comportement d'ensemble – banc ligne d'arbres
3. Comportement local des paliers immergés – banc de frottement et usure
4. Comportement d'assemblage fretté – banc de flexion rotative

1. PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE

Lignes d'arbres des bâtiments de surface et sous-marins :

- participent à la **sécurité plongée** ;
- **tournent** ;
- transmettent **couple** et **poussée** au navire ;
- subissent les perturbations extérieures, notamment **coque** et « environnement » (**houle, ensoleillement...**)



Corrosion
Tribologie
Fatigue mécanique...

1. PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE

Programme de recherche visant à l'**analyse mécanique des modes d'endommagement possibles des ligne d'arbres propulsives**

PTD INCOLA – INTÉRACTIONS ENTRE LA COQUE ET LA LIGNE D'ARBRES DES BS ET SM

- Maître d'ouvrage : Direction générale de l'armement pour la Marine Nationale
- Maître d'œuvre : Naval Group (direction technique et bureaux d'études)
- Partenaires : Laboratoires académiques



1. PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE

Etude des modes **d'endommagement** et analyse des **causes racines** par approches **expérimentale/numérique** :

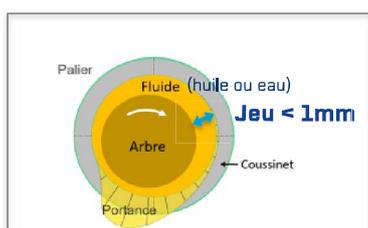
- Lignage et hyperstatisme
- Tribologie des paliers immergés
- Fretting-fatigue assemblage arbre-chemise
- autre (fissuration...)



1. Problématique et contexte
- 2. Comportement d'ensemble – banc ligne d'arbres**
3. Comportement local des paliers immergés – banc de frottement et usure
4. Comportement d'assemblage fretté – banc de flexion rotative

2. COMPORTEMENT D'ENSEMBLE : BANC LIGNE D'ARBRES

Problématique du lignage



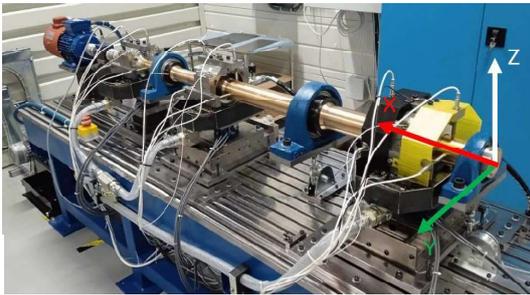
Dimensionnement mécanique : sensibilité à l'hyperstatisme

Déplacements
verticaux ou latéraux :
0-5mm (usure, houle,
enseilleiment)



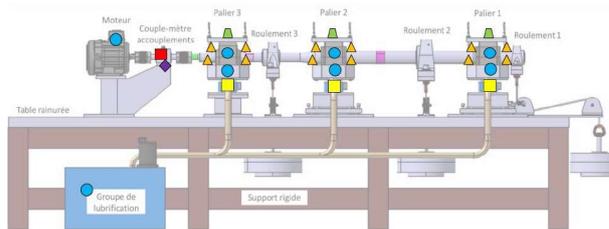
Jusqu' à **50%** de
variation sur :
- **Efforts**
- **Contraintes**

2. COMPORTEMENT D'ENSEMBLE : BANC LIGNE D'ARBRES



Etude de l'hyperstatisme : banc ligne d'arbres

- Arbre - 2m
- $200 < \omega < 1400 \text{ RPM}$
- 2 ou 3 paliers $\varnothing 80\text{mm}$ en huile
- positionnement réglable à $5\mu\text{m}$
- chargement gravitaire total ~ 400kg

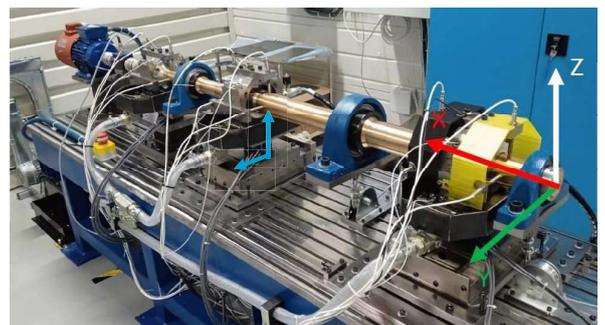
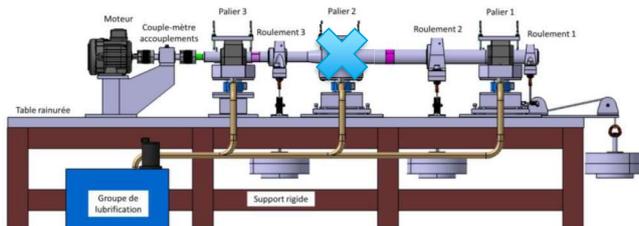


●	Température
▲	Accélérations
▲	Déplacements
■	Efforts - Moments
■	Couple
◆	Vitesse de rotation

2. COMPORTEMENT D'ENSEMBLE : BANC LIGNE D'ARBRES

Campagne expérimentale **hyperstatisme** : **190 configurations**

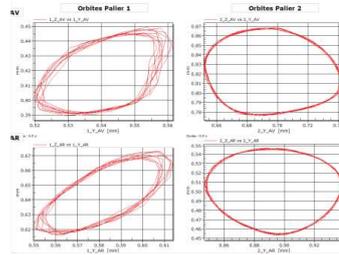
- Altitude et lignage des paliers (y, z) de -1mm à +1mm,
- Vitesse de rotation de 400 RPM à 1400;
- Charges sur les roulements ;
- Fonctionnement sur deux ou trois paliers.



2. COMPORTEMENT D'ENSEMBLE : BANC LIGNE D'ARBRES

Analyse :

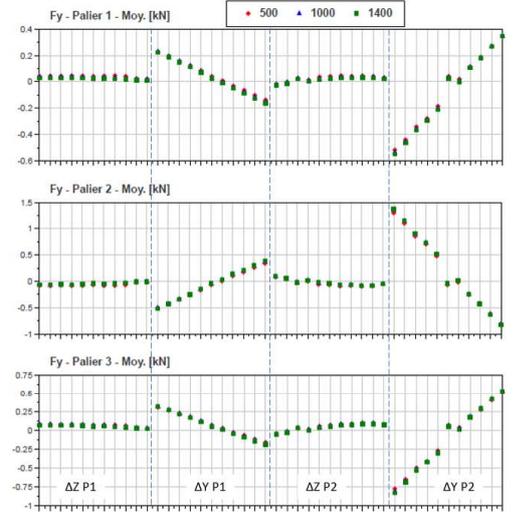
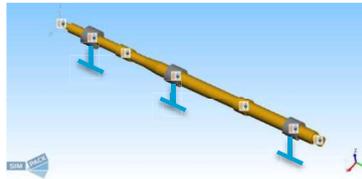
- Orbites



- Chargements / configuration

Finalité :

- comparaison avec simulations
pour validation outil BE

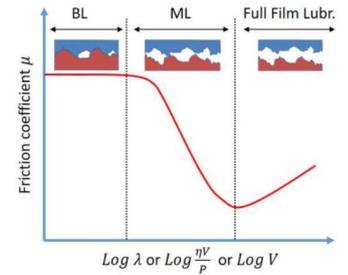
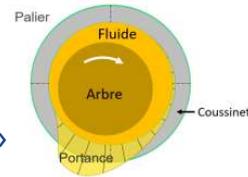


1. Problématique et contexte
2. Comportement d'ensemble – banc ligne d'arbres
- 3. Comportement local des paliers immergés – banc de frottement et usure**
4. Comportement d'assemblage fretté – banc de flexion rotative

3. COMPORTEMENT LOCAL DES PALIERS IMMERGÉS : BANC DE FROTTEMENT ET D'USURE

Tribologie des paliers immergés : enjeux :

- identification des vitesses de rotation « **limites** »
- anticipation des **cinétiques d'usure** et de leur impact sur le fonctionnement de la ligne d'arbres

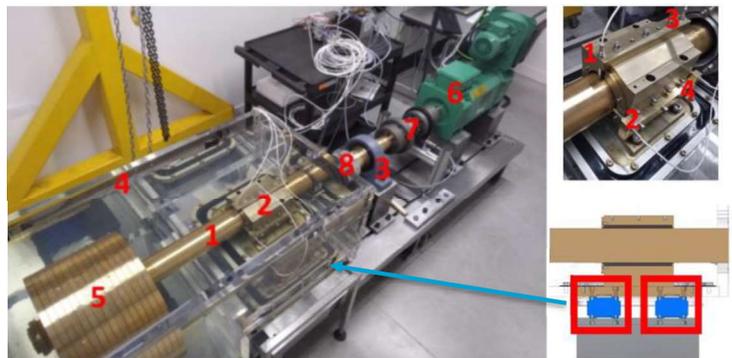
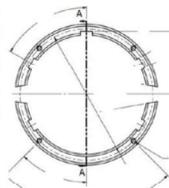


Source : W. Litvin - [Water-lubricated bearings of ship propeller shafts - Problems, experimental tests and theoretical investigations](#)



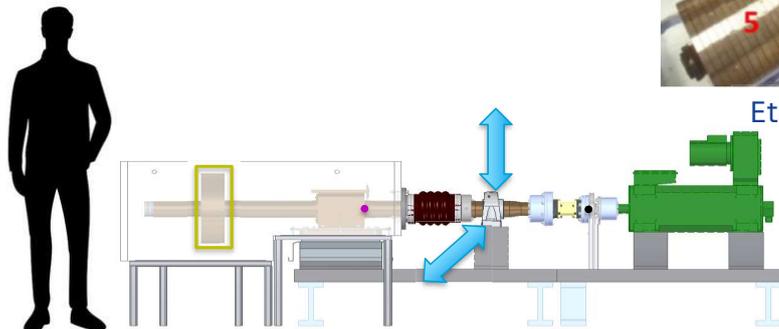
3. COMPORTEMENT LOCAL DES PALIERS IMMERGÉS : BANC DE FROTTEMENT ET D'USURE

Présentation banc palier



Etude de tribologie : banc paliers immergés

- Arbre -2m
- $0 < \omega < 500$ RPM
- 1 palier $\varnothing 100$ mm en eau
- déalignement possible
- chargement gravitaire - 700kg

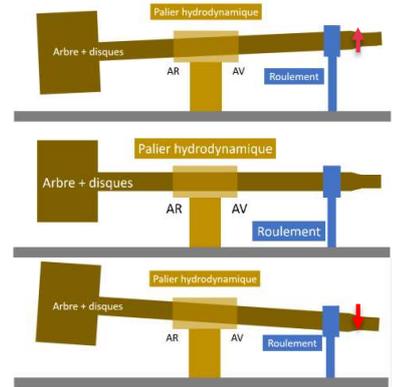


3. COMPORTEMENT LOCAL DES PALIERS IMMERGÉS : BANC DE FROTTEMENT ET D'USURE

Campagne expérimentale en 2 temps :

- Frottement (Stribeck) :

plusieurs chargements, désalignements, changements de sens et accélérations



- Usure

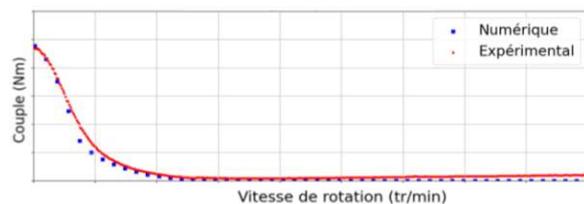
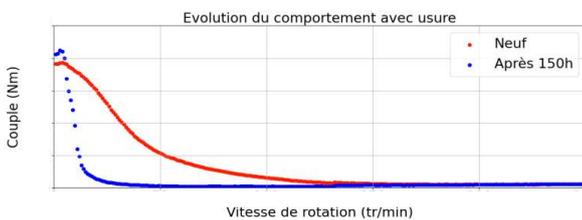
Fonctionnement à faibles vitesses stabilisées durant X centaines d'heures

Comparaison de résultats expérimentaux avec résultats numériques sur outils dédiés **prédictifs**

3. COMPORTEMENT LOCAL DES PALIERS IMMERGÉS : BANC DE FROTTEMENT ET D'USURE

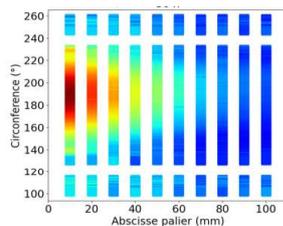
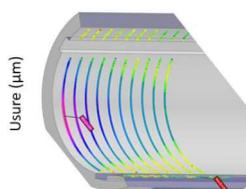
Résultats campagne expérimentale

- Stribeck

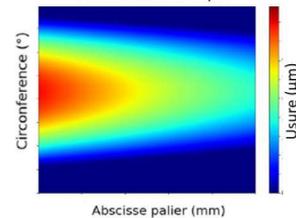


- Usure : X00h

Contrôle dimensionnel



Prédiction numérique



Prédiction correcte **courbe de frottement et volume usé** après X00 heures de fonctionnement

1. Problématique et contexte
2. Comportement d'ensemble – banc ligne d'arbres
3. Comportement local des paliers immergés – banc de frottement et usure
- 4. Comportement d'assemblage fretté – banc de flexion rotative**

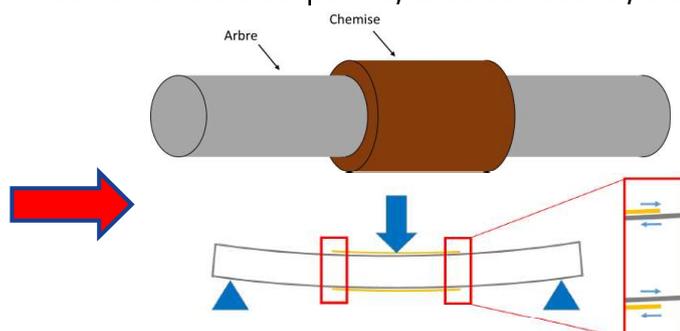
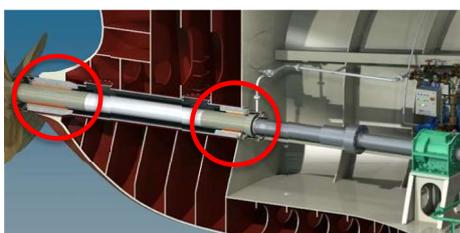
4. COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGE FRETTÉ: BANC DE FLEXION ROTATIVE



Phénomène de fretting-fatigue

- Possible phénomène de fretting fatigue en surface d'arbre sous chemise frettée

- Phénomène d'usure des surfaces ou de fissuration sous l'effet de sollicitations de frottement de faible amplitude répétées
- Phénomène fréquemment rencontré dans : câbles de ponts, d'ascenseurs, aubes de turbines, roulements...



4. COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGE FRETTÉ: BANC DE FLEXION ROTATIVE

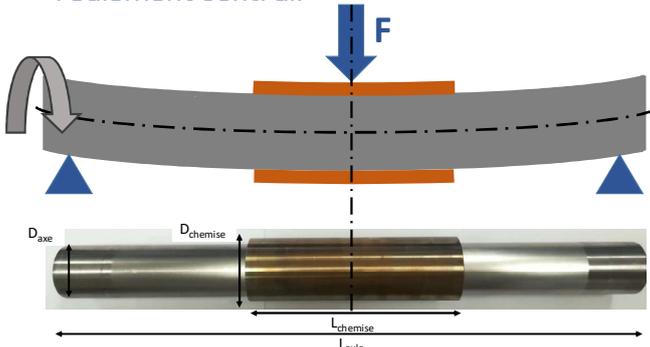


Mise au point d'un banc de flexion rotative pour tester des éprouvettes technologiques

- Fréquence de rotation de 20 Hz soit 1200 tr/min.
- Trois roulements rotules aux deux extrémités et un au centre
- Application d'un effort central de mise en flexion à l'aide d'un système de vis.
- Mesure de la flèche via un capteur de position au niveau du roulement central.



Vue d'ensemble du banc de flexion rotative.



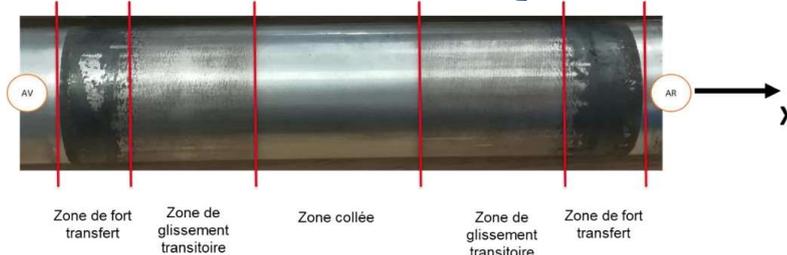
- Un essai est interrompu lorsque la flèche augmente de 10% (du fait de la présence de fissuration) ou que le nombre de cycle de censure est atteint ($20 \cdot 10^6$ cycles).

4. COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGE FRETTÉ: BANC DE FLEXION ROTATIVE

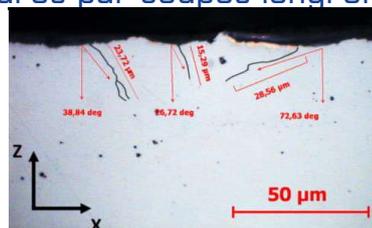


Expertise d'éprouvettes après essais :

- Identification des zones de frottement et glissement

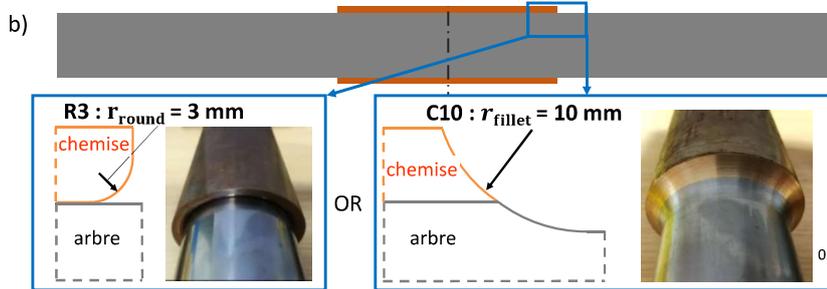


- Analyse des microfissures par coupes longi en bord de contact

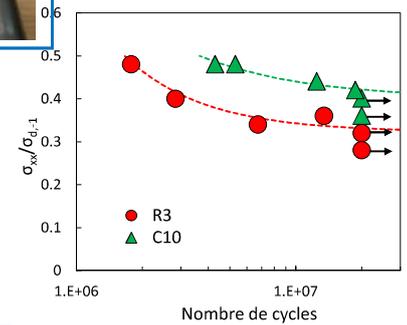


4. COMPORTEMENT D'ASSEMBLAGE FRETTÉ: BANC DE FLEXION ROTATIVE

Comparaison de différents designs de nez de chemises



- Etablissement d'une courbe « de Wohler »
- Parallèlement, développement d'une approche numérique proposition d'une méthodologie de calcul de la durabilité en fretting fatigue des assemblages frettés



1. Problématique et contexte
2. Comportement d'ensemble – banc ligne d'arbres
3. Comportement local des paliers immergés – banc de frottement et usure
4. Comportement d'assemblage fretté – banc de flexion rotative

Synthèse

Grâce à un vaste programme de recherche sponsorisé par la **DGA**, **Naval Group** et ses **partenaires** ont développé **trois dispositifs expérimentaux** dédiés à des **caractérisations** et **validation d'outils numériques** sur les thématiques de premier ordre sur les arbres de propulsion navale :

- **lignage et hyperstatisme**
- **tribologie des paliers immergés**
- **fretting-fatigue dans les assemblages frettés**

Les outils associés sont en cours de transfert vers **les bureaux d'étude** et les dispositifs utilisés pour diverses **caractérisations et expertises**.

Merci pour votre attention

