

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

**NESSARK DJAFAR**

**SALHI ILYAS**

## Thème

---

Etude comparative de la résistance à l'usure des coussinets à  
surfaces texturées / lisses

---

Soutenu le 19/10/2020 devant le jury composé de:

Mr Nasreddine BENSAID

Président

Mr Kamal OURARI

Rapporteur

Mr Abdelatif BELAMRI

Examineur

**ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020**

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner notre grande reconnaissance à M. Kamal OURARI, notre encadreur, pour son accompagnement exemplaire tout au long de nos recherches et l'intention qu'il a portée à notre travail.

Un grand merci à M. Nasreddine BENSAID d'avoir accepté d'être le président du jury.

Nous remercions aussi M. Abdelatif BELAMRI de nous avoir fait l'honneur d'être examinateur de notre travail.

Toute notre reconnaissance à M. Abdelhakim BENSLIMANE, chef de département génie mécanique, et M. Abdelatif BELAMRI, adjoint chef de département génie mécanique, qui nous ont beaucoup soutenu durant notre formation.

Nos très vifs remerciements vont à toutes les enseignantes et tous les enseignants du département Génie Mécanique qui nous ont aidé tout au long de notre cursus universitaire.

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail :

En premier lieu à mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mes études.

À mes frères et sœurs.

À ma fiancée Kahina.

À mon très cher ami Islam.

À tous mes proches ...

À tous mes amis ...

Djafar NESSARK

## Dédicaces

À la mémoire de mon petit frère Fares et ma grande sœur Khoukha.

Je dédie ce travail :

En premier lieu à mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long  
de mes études.

À mes frères et sœurs.

À mes très chers amis Nassim, Bilal et Lamine.

À ma chère petite-amie Yasmine.

À tous mes proches ...

À tous mes amis ...

Ilyas SALHI

## Table des matières

I. Généralités sur les coussinets.....	1
I.1 Introduction .....	1
I.2 Coussinets.....	1
I.3 principales familles des coussinets .....	1
a) Coussinets autolubrifiants.....	1
b) Coussinets composites type glacier .....	2
c) Coussinets polymères (Nylon, PTFE, acétal...) .....	3
I.4 Démontage et montage des coussinets .....	3
I.4.1 Démontage des coussinets .....	3
I.4.2 Montage des coussinets .....	4
I.5 Mode de fixation.....	5
I.6 Domaines d'applications des coussinets .....	6
I.6.1 Le coussinet TU.....	6
I.6.2 Le coussinet TI .....	6
I.6.3 Le coussinet TX .....	6
I.6.4 Le coussinet TY .....	6
I.6.5 Le coussinet TZ .....	6
I.7 frottement et usure des contacts métalliques .....	7
I.7.1 Le frottement .....	8
I.7.2 L'USURE .....	8
I.7.2.1 Les principaux mécanismes d'usure.....	9
I.7.2.2 Usure adhésive : Identification des types d'usure par adhésion .....	9
a) analyse des particules d'usure .....	10
b) examens microscopiques des surfaces usées .....	10
I.7.2.3 L'usure abrasive .....	10

I.7.2.4 L'usure corrosive .....	12
I.7.2.5 Usure érosive .....	12
I.7.2.6 Usure par fatigue .....	12
I.7.2.7 Usure par oxydation .....	12
I.8 Paramètres agissants sur le frottement et l'usure .....	13

## **II. Étude expérimentale de l'effet de texture de surface sur les performances des paliers lisses**

II.1 Introduction .....	15
II.2 Procédure expérimentale .....	15
II.3 Le grément était principalement composé .....	16
II.4 principaux types de tests ont été réalisés .....	20
II.5 Caractéristiques des paliers lisses examinés.....	21
II.6 Analyse de surface après tests .....	33
II.7 Conclusions .....	38

## **Synthèse**

III.1 Objectif du travail.....	40
III.2 Analyse et discussion.....	40
III.3 Extraction des paramètres qui agisse sur les comportements des paliers testé (tourillon – coussinet) .....	41
III.3.1 Le premier test à une vitesse $n=100$ tr /min.....	41
a) Analyse des graphes .....	42
III.3.2 Le deuxième test à une vitesse $n=500$ tr /min.....	43
b) Analyse des graphes .....	44
III.4 CONCLUSION.....	46



## Liste des figures

### Chapitre I

**Figure 1 :** Coussinets en bronze fritté

**Figure 2 :** Vue en coupe des coussinets composites PTFE

**Figure 3 :** Coussinets A BRIDE cylindrique en polymère

**Figure 5 :** Vue en coupe d'un assemblage coussinet

**Figure 4 :** Extraction à la presse d'une douille d'un coussinet

**Figure 6 :** Vue en coupe des Modes de fixation des coussinets

**Figure 7 :** Représentation schématique du tribomètre utilisé par Archard

**Figure 8 :** Les quatre modes d'usure abrasive

**Figure 9 :** Aspect d'un profil d'usure

### Chapitre II

**Figure 1 :** (a) Photographie (b) schéma du banc d'essai PG21L pour tester les paliers lisses

**Figure 2 :** Vue en coupe du palier lisse testé

**Figure 3 :** Photo du système de mesure du couple de frottement

**Figure 4 :** Photographie du coussinet et de tourillon avec des surfaces non texturées

**Figure 5 :** (a) Photographies du tourillon et (b) du coussinet avec des surfaces texturées

**Figure 6 :** (a) de la topographie de surface du tourillon en acier, (b) profil de rugosité entre les cavités, et (c) d'une cavité

**Figure 7 :** (a) de la topographie de la surface de coussinet en bronze, (b) profil de rugosité entre les cavités, et (c) d'une cavité

**Figure 8 :** Valeurs de couple de frottement des paliers lisses examinés avec différentes textures de surface à une vitesse de rotation  $n = 100 \text{ tr / min}$



**Figure 9 :** Valeurs de température d'huile des paliers lisses examinés avec diverses textures de surface à une vitesse de rotation  $n = 100$  tr / min

**Figure 10 :** Valeurs du coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 100$  tours par minute

**Figure 11 :** Valeurs de couple de frottement des paliers lisses examinés avec différentes texture de surface à une vitesse de rotation  $n = 500$  tr / min

**Figure 12 :** Valeurs de coefficient de frottement des paliers examinés avec différent texture de surface érent à la vitesse de rotation  $n = 500$  tours par minute

**Figure 13 :** Valeurs de température d'huile des paliers lisses examinés avec de texture de surface à une vitesse de rotation  $n = 500$  tr / min

**Figure 14 :** Photographies de revues après essais tribologiques, agissant avec (a) palier lisse, (b) palier texturé et (c) palier lisse

**Figure 15 :** Surface profiles des tourillons coopérantavec (a) palier lisse, (b) en appui texturé, et (c) palier lisse

**Figure 16 :** Photographies de coussinet après les tests tribologiques, coopérantavec (a, b) des tourillons lisses et (c) un tourillon texturé

**Figure 17 :** Surface profiles des paliers coopérant avec (a, b) des revues lisses et (c) revue texturé

### III Synthèse

**Figure 18 :** Valeurs de couple de frottement et coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 100$  tours par minute

**Figure 19 :** Valeurs de couple de frottement et coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 500$  tours par minute

# Introduction générale

Les coussinets sont des organes de machines tournantes, ils sont utilisés pour supporter les charges des arbres en rotation à des différentes vitesses et de les maintenir en équilibre.

Les coussinets ont pour objectifs de minimiser le frottement qui se produit entre les arbres et les coussinets. à cet effet le choix des matériaux et leurs texture joue un rôle essentiel sur le bon fonctionnement des mécanismes des machines tournantes.

C'est pour cette raison que la variété des coussinets est nécessaire pour satisfaire toutes les installations des arbres tournants.

Dans ce travail, nous nous intéressons à un type de coussinets utilisé dans plusieurs mécanismes des machines tournantes, qui est le coussinet en bronze avec ses caractéristiques.

Les coussinets en bronze sont des bagues cylindriques, de forme tubulaire et avec ou sans collerette, interposés entre un arbre et son logement pour faciliter le mouvement de rotation. Ils sont fabriqués à partir de matériaux possédant des bonnes qualités de frottement (bronze, plomb, graphite, fer, ptfé, etc ...) et peuvent être utilisés à sec ou avec de la graisse.

Le but de cette étude est d'analyser les performances des coussinets en bronze, ainsi de citer les différents paramètres qui influent sur leur qualité et leur rendement.

Dans ce mémoire, nous effectuons une étude sur les coussinets en bronze en prenant en considération des résultats extraits d'un article scientifique qui a fait l'objet d'une étude expérimentale des effets de la texture de surface sur la fiabilité des paliers lisses.

La détermination (le choix) du type de coussinet dépend du calcul du coefficient de frottement (faible ou élevé), ce dernier varie selon la vitesse de rotation du tourillon et le couple de frottement.

# Chapitre I

# Chapitre II

# Synthèse

## I.1 Introduction

Les coussinets sont des organes de machines utilisés pour supporté les charge des arbres en rotation, il existe plusieurs types des coussinets qui sont utilisé dans différents domaines.

Le coussinet a pour but de réduire les frottements entre les deux surfaces en contact à des vitesses et des charges différentes, et pour maintenir les arbres en rotation en équilibre et d'assurer la stabilité des machines tournantes, c'est pour cela le choix des matériaux pour la fabrication des coussinets et très important afin de réduire les frottements provoqués par les surfaces des arbres en rotation et de minimiser l'usure de ces derniers.

Le rendement et la durée de vie des coussinets sont dus à la qualité des surfaces, les matériaux de fabrication utilisés et la lubrification adéquate.

## I.2 Coussinets

Les coussinets sont des bagues cylindriques, de forme tubulaire, avec ou sans collerette, interposées entre un arbre et son logement pour faciliter le mouvement de rotation.

Construits à partir de matériaux présentant de bonnes qualités de frottement (bronze, étain, plomb, graphite, Téflon, PTFE, polyamide), ils peuvent, suivant les variantes, être utilisés à sec ou avec lubrification.

Il existe de nombreuses familles aux dimensions normalisées et de nombreux produits dérivés : rondelles, rotules, bandes de frottement, pièces sur mesure.

## I.3 principales familles des coussinets

### a) Coussinets autolubrifiants

Ils sont fabriqués en métal fritté à base de bronze, poreux (porosités entre 15 et 35 % en volume), avec incorporation de lubrifiant (huile, graphite, etc.) dans les porosités. Dans le cas de l'huile, la structure, comparable à une éponge, restitue l'huile en fonctionnement et l'absorbe à l'arrêt.

Variantes solutions fonctionnant à sec jusqu'à des vitesses périphériques de 6 m/s ; solutions tout carbone ou graphite supportant des vitesses élevées, jusqu'à 13 m/s.

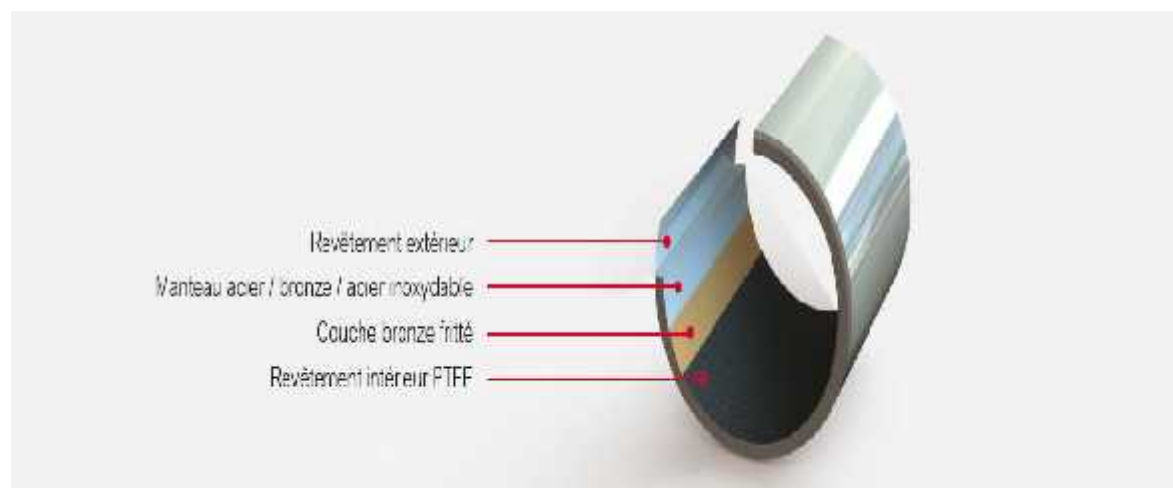


**Figure 1 :** Coussinets en bronze fritté

### b) Coussinets composites type glacier

Ils peuvent fonctionner à sec ou avec un léger graissage au montage sous des vitesses périphériques inférieures à 3 m/s.

Ils sont constitués de trois couches différentes. La base est une tôle d'acier roulée recouverte d'une couche de bronze fritté. La surface de frottement peut être en résine acétal ou en polytétrafluoroéthylène (PTFE) avec addition d'un lubrifiant solide : plomb, graphite, bisulfure de molybdène MoS<sub>2</sub>, ...



**Figure 2 :** Vue en coupe des coussinets composites PTFE

### c) Coussinets polymères (Nylon, PTFE, acétal...)

Surtout utilisés lorsqu'il est nécessaire d'avoir une grande résistance chimique (acides, bases...). Inconvénients : le fluage sous charge et un faible coefficient de conductivité thermique empêchant une bonne évacuation des calories [1].



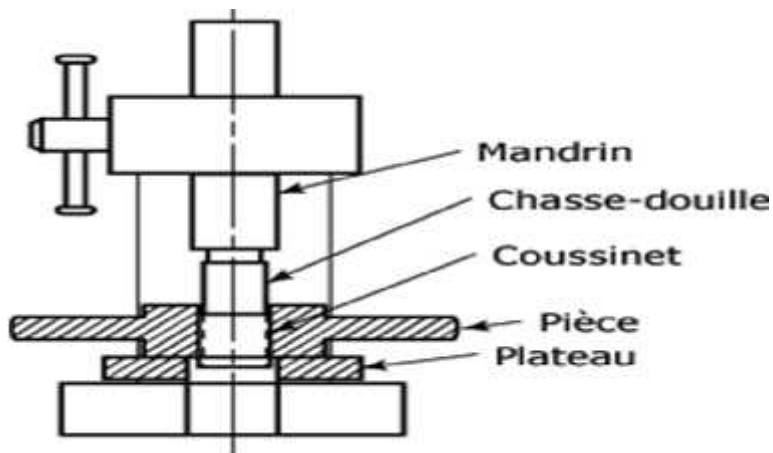
**Figure 3 :** Coussinets à bride cylindrique en polymère

## I.4 Démontage et montage des coussinets

### I.4.1 Démontage des coussinets

#### a) Extraction à la presse

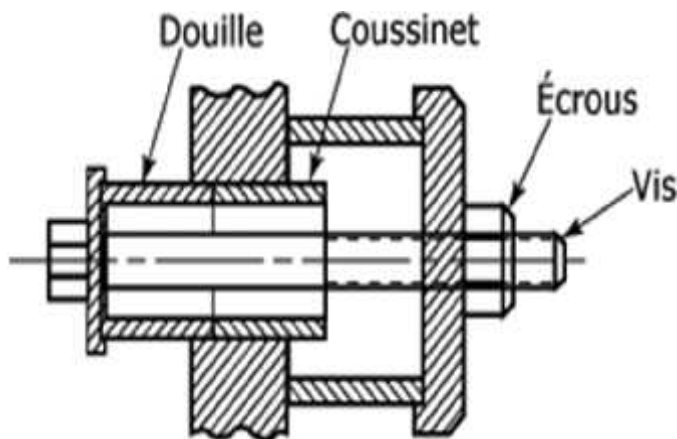
Pour démonter les douilles de coussinets dans les paliers, la méthode la plus simple consiste à repousser le coussinet dans son logement, soit à l'aide d'une presse à mandrin et d'une douille légèrement plus petite que le manchon (figure 4), soit en utilisant un extracteur muni d'un chasse-douille.



**Figure 4 :** Extraction à la presse d'une douille d'un coussinet



## b) Extracteur de douilles



**Figure 5 :** Vue en coupe d'un démontage coussinet

On peut les enlever tout simplement en utilisant un marteau et une douille de frappe. Lors du démontage, il faut faire en sorte que le coussinet glisse sans accrochage sur les pièces externes afin d'éviter des bris dans le manchon.

#### I.4.2 Montage des coussinets

Il existe plusieurs méthodes pour monter un coussinet dans son logement. Le mode choisi dépendra de l'application, mais aussi de la facilité de montage et de démontage. En outre, les parois du palier devront avoir une épaisseur uniforme afin d'éviter que des points faibles ne conduisent pas à des écarts plastiques ou thermiques.

L'ajustement avec serrage est un mode de montage courant et efficace qui consiste à ajuster le coussinet dans son logement avec serrage. Cette méthode permet de maintenir une épaisseur uniforme des parois sur toute la longueur du palier.

Il y a sur le marché des coussinets dont les diamètres intérieurs sont finis en formats qui peuvent aller jusqu'à environ 5 pouces de diamètre intérieur. Le diamètre extérieur des coussinets standard de 3 pouces et moins mesure généralement entre 0,002 et 0,003 po de plus que le diamètre nominal. Pour les coussinets de plus de 3 po, le diamètre extérieur réel dépasse de 0,003 à 0,005 po le diamètre nominal. Étant donné que les coussinets standard respectent ces tolérances, le degré de serrage de l'ajustement dépend des dimensions de l'alésage de leur logement.

L'ajustement avec serrage a pour effet de resserrer légèrement l'intérieur du coussinet. En général, le diamètre intérieur du degré de serrage. N'essayez pas de prévoir précisément le degré de resserrment dans l'espoir d'éviter l'usinage de l'ajustement.

L'ajustement avec serrage peut être réalisé en refroidissant d'abord le coussinet dans l'air liquide ou dans un mélange d'alcool et de glace sèche. Il s'agit d'une méthode plus simple et plus recommandable que celle qui consiste à réchauffer le logement du coussinet. Le mélange d'alcool et de glace sèche atteint une température de  $-43^{\circ}\text{C}$  et l'air liquide commence à bouillir à  $-190^{\circ}\text{C}$ .

Lorsque vous poussez un coussinet dans son logement, il importe d'y appliquer une pression uniforme afin d'éviter tout coincement ou dérèglement du coussinet. Il est tout aussi important que les surfaces de contact de l'ajustement soient propres, lisses et exemptes de tout défaut d'usinage.

### I.5 Mode de fixation

Il existe plusieurs méthodes pour maintenir la position du coussinet par rapport à son logement en les fixant l'un à l'autre. La figure suivante montre quelques-unes de ces méthodes : *a)* à vis de blocage, *b)* à clavettes disques ou *Woodruff*, *c)* à bride boulonnée, *d)* à coussinet vissé, *e)* à goupille cylindrique et *f)* à couvercle de logement.

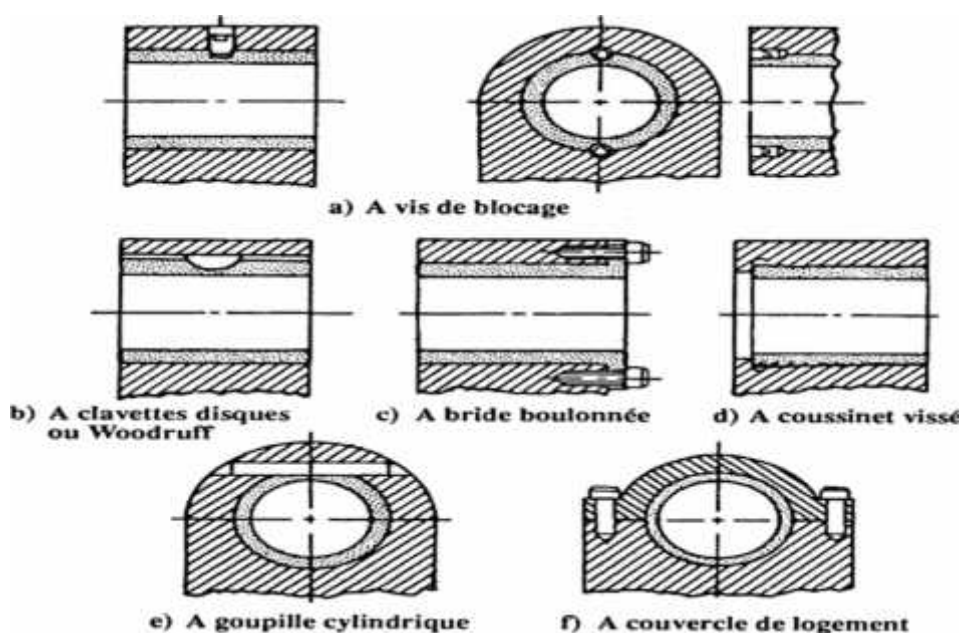


Figure 6 : Vue en coupe des Modes de fixation des coussinets

## **I.6 Domaines d'applications des coussinets**

**I.6.1 Le coussinet TU** est utilisé dans les applications industrielles, dans les matériels à destination des professionnels et du grand public : imprimerie, robotique, manutention, automobile, électroménagers, ect.

**I.6.2 Le coussinet TI** ne comporte pas de bronze. Il est ainsi largement utilisé dans l'industrie chimique. Sa tenue à la corrosion lui permet également d'être monté dans des applications aussi diverses que les éléments de piscine ou la marine. Enfin, il est très apprécié dans l'industrie agro-alimentaire.

**I.6.3 Le coussinet TX** est souvent utilisé dans des milieux sévères, particulièrement dans l'agriculture et les travaux publics. On le retrouve aussi dans les systèmes de manutention, dans les remontées mécaniques ou encore dans le mobilier de bureau.

**I.6.4 Le coussinet TY** est principalement utilisé dans des applications à forte charge nécessitant un graissage particulier. Il est présent dans le matériel de travaux public ainsi que dans les presses et laminoirs. Plus compact, il remplace avantageusement les coussinets usinés en bronze.

**I.6.5 Le coussinet TZ** de conception robuste, s'adapte bien aux forte charges et est particulièrement adapté au véhicules de transport, aux presses, aux laminoirs, ainsi qu'à tous les systèmes industriels [2].

Tableau 1 : récapitulatif des principaux profils des coussinets [2].

							
			TU	TI	TX	TY	TZ
Utilisation standard			A sec	A sec	Pré-graissé	Pré-graissé	Graissé
Charge	Statique	N/mm <sup>2</sup>	250	250	250	250	200
	Dynamique charge statique	N/mm <sup>2</sup>	140	100	140	150	100
	Dynamique charge dynamique	N/mm <sup>2</sup>	60	40	70	70	70
Vitesse	Utilisation strd	m/s	2,5	2	2,5	2,5	2
	Lubrifié à l'huile	m/s	> 3	> 3	> 3	> 3	> 3
Facteur PV max	Utilisation strd en pointe	N/mm <sup>2</sup> .m/s (W/mm <sup>2</sup> )	3,6	1	2,8	2,8	2,8
	Utilisation strd en continu	N/mm <sup>2</sup> .m/s (W/mm <sup>2</sup> )	1,8	0,8	2,8	2,8	2,8
	Lubrifié à l'huile	N/mm <sup>2</sup> .m/s (W/mm <sup>2</sup> )	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
Coef. de frottement	A sec ou pré-graissé		0,20 0,08	0,18 0,03	0,25 0,15	0,15 0,05	0,20 0,05
	Lubrifié à l'huile		0,07 0,02	0,07 0,02	0,15 0,05	0,12 0,05	0,12 0,05
Dureté d'arbre		HB	>120	>120	>270	> 53 HRC	> 50 HRC
Rugosité d'arbre		µm (Ra)	1,25 0,40	0,90 0,30	0,80 0,20	0,63 0,16	1,00 0,40
Température		°C	+280 -200	+280 -200	+120 -40	+250 -40	+150 -40
Conductivité thermique		W(m.K) <sup>-1</sup>	40	10	52	47	58
Coef. dilata-tion thermique		K <sup>-1</sup>	11.10 <sup>-6</sup>	16.10 <sup>-6</sup>	11.10 <sup>-6</sup>	18.10 <sup>-6</sup>	18,5.10 <sup>-6</sup>

### I.7 Frottement et usure des contacts métalliques

#### Considérations générales

La tribologie a pour objet d'étudier le frottement, la lubrification et l'usure sous leurs multiples aspects. Dans de nombreux cas, une réduction de l'usure est recherchée, ainsi qu'une minimisation du frottement cause de dissipation de l'énergie mécanique. Mais dans certains cas, beaucoup de frottement avec peu d'usure est souhaité (freins, embrayage) ou bien l'inverse, dans les procédés d'enlèvement de matière (usinage).

Les conditions de frottement et les mécanismes d'endommagement dépendent d'une multitude de facteurs constituant le tribosystème.

Les caractéristiques des premiers corps, c'est-à-dire des deux pièces, des deux matériaux en contact,

- ) caractéristiques du troisième corps (débris d'usure et/ou lubrifiant) situé à l'interface entre les premiers corps,
- ) mouvements relatifs des corps en contact, efforts appliqués et efforts transmis par le contact, environnement (atmosphère, température).

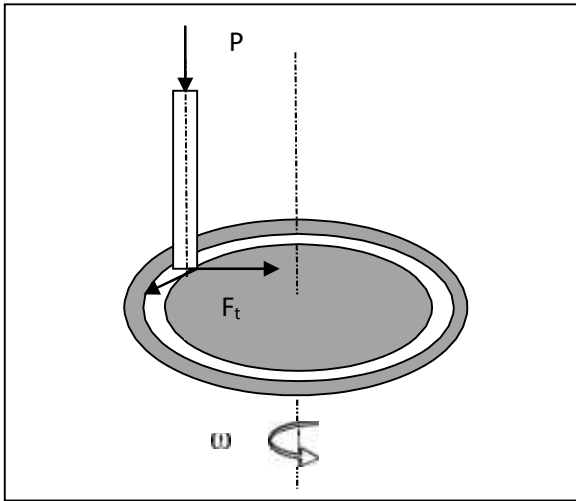
### **I.7.1 Le frottement**

- ) Le frottement peut être défini comme la résistance tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre.
- ) Le frottement est aussi défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement.
- ) En frottement métal-métal, et avec ou sans lubrification, les alignements d'aspérités provenant du mode d'usinage des pièces (tournage, fraisage, rectification) doivent être, perpendiculaires au sens du mouvement. Toutes autres choses égales par ailleurs, cette configuration réduit les risques de grippage et conduit aux plus bas coefficients de frottement. Enfin, l'état structural et physique des surfaces conditionne pour une large part leur comportement en frottement. Lorsque l'on veut faire deux métaux, on les choisit de préférence insolubles. Cette règle peut cependant être profondément perturbée par les réactions des métaux avec l'ambiance (oxydation, sulfuration, réaction avec les additifs des lubrifiants).

### **I.7.2 L'USURE**

L'usure est le résultat de plusieurs mécanismes isolés ou simultanés pouvant intervenir de façon prioritaire ou sélective et par conséquent contrôlent le comportement du matériau des pièces en mouvement sous contact. Elle cause la défaillance par la perte de propriétés ou des dimensions requises des pièces et provoque ainsi des endommagements imprévus des pièces et des machines. La résistance à l'usure dépendra plus des propriétés superficielles que volumique. Les aspérités transmettent les contraintes à la surface même en présence d'un lubrifiant. A partir des expériences tribologiques faites avec un frotteur cylindrique sur un disque (Figure 7), Archard

mesure les différentes usures de matériaux frottant à sec et il constate que les taux d'usure (perte de volume divisée par la distance parcourue) varient, dans un rapport de 1 à  $10^5$ , alors que les coefficients de frottement sont dans le rapport de 1 à 5 l'expression proposée par Archard est [3] :  $\Delta V = KPL/H$  ;  $\Delta V$  : les perte volumique ;  $k$  : taux d'usure ;  $p$  : la charge ;  $L$  : la longueur ;  $H$  : la profondeur de l'usure.



**Figure 7** : Représentation schématique du tribomètre utilisé par Archard [3]

**Tableau 2** : valeurs du taux d'usure  $K$  et du coefficient de frottement  $\mu$ , obtenues dans les conditions  $P = 4\text{N}$  et  $V = 1,80\text{ m/s}$  [4].

Matériaux	Taux d'usure ( $10^{-10}\text{ cm}^3/\text{cm}$ )	$\mu$	$K$
Acier doux/acier doux	1570	0,62	$7 \cdot 10^{-3}$
Laiton 60/40	240	0,24	$6 \cdot 10^{-4}$
Acier inoxydable ferritique	2,7	0,53	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Polyéthylène	0,3	0,65	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Carbure de tungstène/carbure de tungstène	0,02	0,35	$1 \cdot 10^{-6}$

### I.7.2.1 Les principaux mécanismes d'usure

L'usure est le processus d'endommagement des surfaces en contact, sous l'effet du frottement. Dans la référence, Kong et Ashby ont analysé le mécanisme d'usure des différents matériaux

solides. Les mécanismes d'usure identifiés sont :

Usure par rupture fragile (usure de fatigue) ;

Usure par rupture thermomécanique;

Endommagement de choc thermique.

### **I.7.2.2 Usure adhésive : Identification des types d'usure par adhésion**

Elle se manifeste par le transfert de matière de l'un des premiers corps sur le corps antagoniste et elle est susceptible d'aboutir au grippage du dispositif. L'usure adhésive résulte de la formation des micro-jonctions entre les surfaces en contact et la création de micro-rupture.

Il est généralement admis, que l'usure par adhésion peut être divisée en deux classes : L'usure sévère et l'usure douce. Ces deux types d'usure sont entièrement phénoménologiques [3], pour les distinguer, on base sur les observations suivantes :

La résistance électrique de contact, la composition et la taille des débris d'usure et enfin la topographie des surfaces usées.

#### **a) analyse des particules d'usure**

Pour une usure sévère, les débris contiennent beaucoup de métal et sont de dimensions supérieures à  $10\ \mu\text{m}$  par contre, si l'usure est douce, les particules sont constituées essentiellement d'oxydes obtenus par réactions chimiques avec le milieu ambiant, leurs diamètres étant compris entre  $100\ \text{Å}$  à  $1\ \mu\text{m}$  [3].

#### **b) examens microscopiques des surfaces usées**

Lorsqu'il s'agit d'une usure sévère, les traces engendrées par frottement sont profondes, par conséquent, les surfaces sont rugueuses, alors que pour une usure douce, les surfaces frottées sont lisses, souvent plus lisses que leur finition initiale.

### **I.7.2.3 L'usure abrasive**

L'usure abrasive est due au contact entre une particule et la surface d'un solide. Lors de son passage dans le contact, cette particule peut enlever de la matière selon quatre modes d'enlèvement de matière (Figure 8). Elle peut :

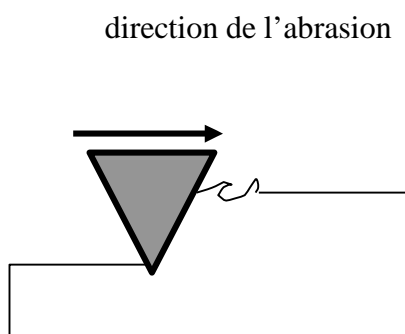
- couper, si elle est suffisamment aiguisée,
- repousser la matière en surface,

- provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

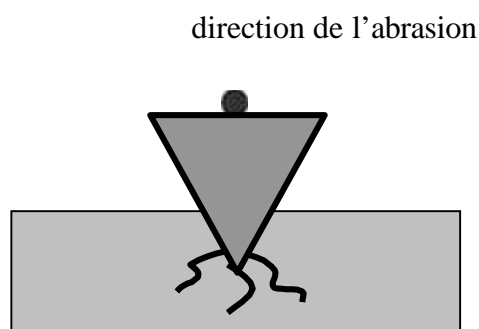
Ces deux derniers modes se produisent plus rarement que les deux premiers. La nature de l'usure abrasive est aussi déterminée par le mode d'acheminement des particules dans le contact.

- si les particules sont fixées à l'une des deux surfaces, il s'agit d'abrasion à deux corps.

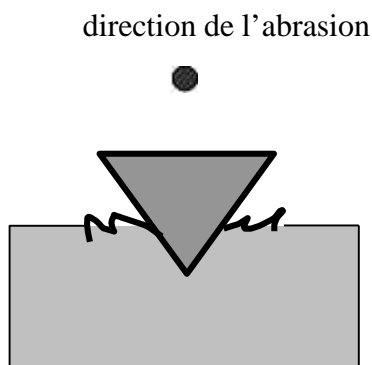
Si les particules sont libres de rouler ou de glisser par rapport aux deux surfaces, on parle alors d'abrasion à trois corps. L'usure abrasive est donnée par l'expression :  $U_{\text{abrasive}} = K_g P C_f V_g$



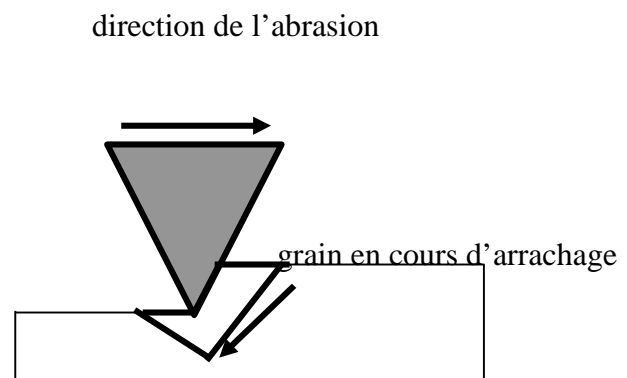
(1) Découpe



(2) Fracture



(3) Fatigue due au labourage répété



(4) Arrachage de grain

**Figure 8** : Les quatre modes d'usure abrasive [3]



Pour une cinématique donnée, il existe deux moyens de prolonger la durée de vie d'un contact vis-à-vis de l'usure par abrasion. Il faut soit diminuer la teneur en abrasif, soit en diminuer ses effets. L'efficacité d'un abrasif est liée à sa forme, à sa taille, et au rapport de sa dureté à celle du matériau abrasé.

Williams (1992) montre que si la taille de l'abrasif est plus petite que celle du film d'huile, l'usure sera faible et aucune direction d'usure privilégiée n'apparaîtra. Si la taille des particules abrasives est supérieure à celle du film, des stries apparaîtront dans la direction du glissement [3].

Dans le cas d'une abrasion à trois corps avec des particules dures, il est donc intéressant d'augmenter la durée de vie des surfaces à protéger. Cependant, si l'un des deux solides en contact est beaucoup plus mou que l'autre, les particules vont s'enchâsser à sa surface et l'abrasion à trois corps revient à une abrasion à deux corps. Seul le matériau dur va alors s'user, le matériau mou étant protégé par les particules dures.

#### **I.7.2.4 L'usure corrosive**

La corrosion est définie comme l'usure graduelle d'une surface par un processus chimique ou électrochimique. Si l'on superpose un enlèvement mécanique du produit de réaction durant le mouvement relatif des pièces en contact, on arrive à une situation appelée l'usure corrosive.

L'usure corrosive est donc l'enlèvement mécanique de produit de corrosion, quel que soit le processus mécanique qui provoque cet enlèvement de matière (abrasion, adhésion, fatigue.....etc.), par opposition, on appellera usure métallique, l'enlèvement mécanique de métal non corrodé.

#### **I.7.2.5 Usure érosive**

Elle correspond à une perte de matière par la surface d'un solide au contact d'un fluide en mouvement contenant des particules solides. Elle se manifeste sur les matériaux fragiles par des fissures et des éclats microscopiques et sur les métaux ductiles par des piqûres, rayures ou alors par polissage.

#### **I.7.2.6 Usure par fatigue**

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par

fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique. Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèlement à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. La théorie d'Hertz permet d'estimer la répartition des contraintes de cisaillement en sous-couche. L'analyse des transferts thermiques sur la microstructure (déplacement des lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints de grains...) explique la formation de fissure associée à un écrouissage ou à un adoucissement de la surface [3].

### I.7.2.7 Usure par oxydation

L'usure par oxydation est un mécanisme d'usure douce, elle découle de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métalliques mises à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal. Le taux d'oxydation est ensuite contrôlé par la diffusion de l'oxygène dans les couches superficielles. Ainsi, les films d'oxyde se développent sur le plateau de contact à la température, l'usure se produit alors par écaillage de l'oxyde et émission de débris, soit quand la couche oxydée atteint une épaisseur critique  $c$  (1 à 3  $\mu\text{m}$ ), soit lors du contact des aspérités.

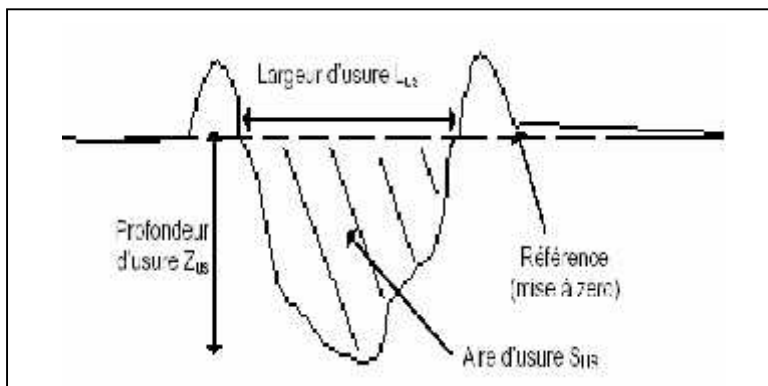


Figure 9 : Aspect d'un profil d'usure [3]

## I.8 Paramètres agissants sur le frottement et l'usure

En général, la perte de masse quantifiant l'usure d'un corps mou glissant sur une surface dure est proportionnelle non seulement à la distance de glissement, mais aussi à la charge normale appliquée  $P$ .

Pour les aires de contact élevées, le coefficient de frottement est indépendant de la charge

normale. En revanche, pour les très petites aires de contact, quand  $P$  croît, peut soit augmenter, dans le cas du glissement diamant sur céramique, soit diminuer, dans le cas du glissement métal sur métal.

La température de contact lors des essais d'usure varie d'une manière spontanée et aléatoire. Cette température de contact dépend essentiellement de la nature du couple des matériaux en contact de la charge et de la vitesse. Cependant la mesure de la température est très difficile à effectuer compte tenu du choix de l'endroit de prise de la température et des phénomènes d'évacuation de la chaleur et de la dissipation de l'énergie.

Au cours des essais d'usure pour différentes vitesses de glissement, la température augmente d'une manière progressive en fonction de la vitesse puis elle s'élève brutalement au fur et à mesure qu'on se rapproche du point de contact, et enfin on prouve par observation métallographique que l'échantillon subit un écoulement plastique provoqué par l'élévation de la température en fonction de la vitesse.

En règle générale, le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la vitesse de glissement. Par ailleurs, l'élévation de la température des matériaux en contact influence leur résistance à l'usure, sachant qu'elle entraîne une dégradation de leurs propriétés mécaniques [3]

Remarquons enfin que l'état géométrique (rugosité) et physico-chimique des surfaces des matériaux en contact glissant influence grandement le comportement tribologique du couple de frottement.

On peut conclure que les paramètres influençant le frottement et l'usure sont :

- la charge normale ;
- la température ;
- l'aire de contact ;
- l'état physico-chimique des surfaces frottant (la rugosité, les couches d'oxydes) ;
- la structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (dureté) ;
- l'absence ou la présence d'un lubrifiant ;
- la présence d'agents actifs en frottement (additifs anti-usure).



**II.1 .Introduction**

La majorité des mécanismes des machines tournantes sont souvent supportés par des paliers lisses, Ces éléments, très actifs, contribuent de façon significative à la bonne marche et la stabilité de l'ensemble de la machine.

c'est paliers son constitué de coussinet et de tourillon qui sont parfaitement ajusté l'un par rapport a l'autre afin d'assuré un bon fonctionnement de rotation des arbres ,a cet effet les deux éléments essentielle de ses paliers doivent être fabriquer avec des matériaux adéquate et avec une haute précision, pour minimisait les frottements entre les deux surfaces en contact a des différentes charge applique sur les le palier lisse ,et cela conduit a minimisait l'usure de ces deux éléments (tourillon et coussinet ) et d'augmenté les performances de ces paliers.

**II.2 Procédure expérimentale**

Une série de tests complets sur le coussinet prototype ont été effectués au laboratoire de tribologie de la faculté de génie mécanique de l'Université de technologie de Gdansk. Les tests ont été réalisés sur le banc d'essai PG21L

La plate-forme était contrôlée par ordinateur, avec une boucle de rétroaction interne pour l'ajustement des paramètres d'entrée, et avait un système d'acquisition de données informatisé (avec une répétabilité élevée des conditions de test et une résistance aux interférences). Cela était particulièrement important lors de la réalisation d'essais comparatifs sur différents types de texturation de surface de variantes des coussinets individuels. La vue générale et un schéma de la plate-forme sont présentés sur la (figure1).

**II.3 Le grément était principalement composé**

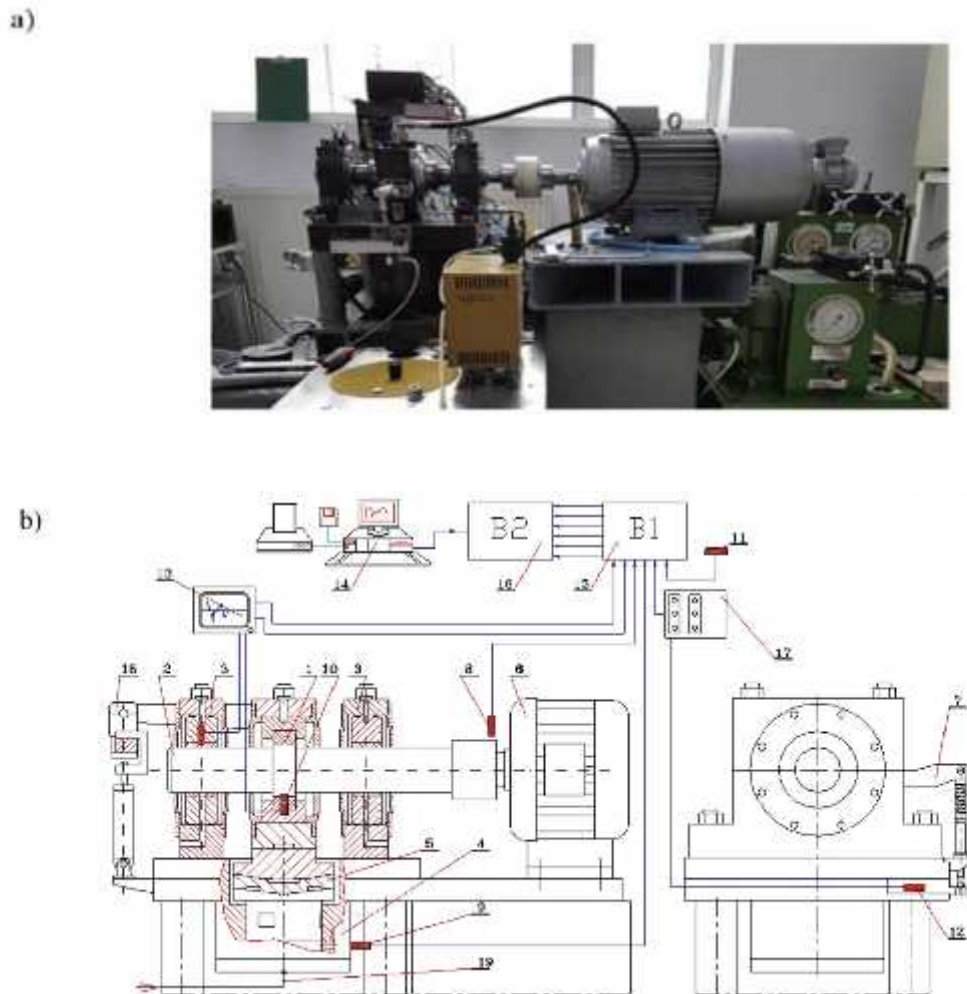
- une tête d'essai dans laquelle le coussinet testé a été placé
- une unité d'entraînement, qui a forcé le mouvement de rotation du tourillon de palier, y compris l'arbre et les paliers du support
- un système hydraulique produisant une charge radiale Spécifique sur le coussinet testé
- les systèmes hydrauliques chargés de la lubrification des paliers d'appui et des paliers hydrostatiques de la tête d'essai
- systèmes de contrôle automatique
- systèmes d'acquisition de données de mesure.

La figure (2) : présente la tête d'essai avec l'arbre et le coussinet testé.

Pour obtenir les résultats de mesure les plus précis, le coussinet testé a été scellé uniquement avec des joints à labyrinthe.

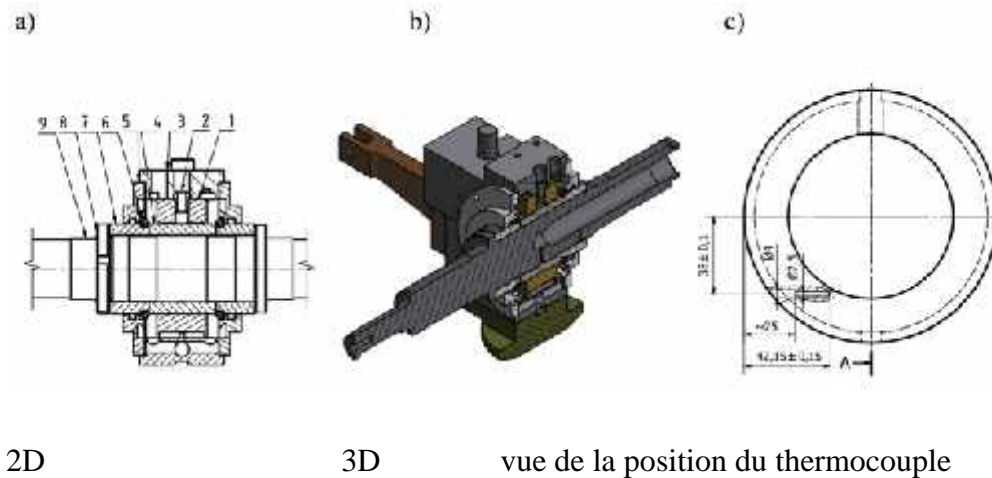
Deux joints toriques ont été utilisés pour limiter les fuites à travers les couvercles pendant le test.

Un thermocouple a été monté dans un trou percé directement dans le coussinet.



**Figure 1 :** (a) Photographie (b) schéma du banc d'essai PG21L pour tester les paliers lisses, 1 - palier testé, 2 - arbre, 3- palier de support, 4- vérin hydraulique, 5 –support hydrostatique, 6 -AC moteur, 7 -capteur de force de frottement ,8 - capteur de vitesse de rotation, 9 -capteur de pression, 10 - capteur de température du coussinet, 11 - capteur de température, 12 - capteur de force de frottement (jauge de contrainte), 13 - panneau de température, 14 - PC , 15 - transducteur, 16 - Advantech PCL-812PG carte, -17 signal de force de frottement amplificateur, 18 - installation du coussinet

d'inclinaison, et 19 - alimentation en huile hydraulique.



**Figure 2 :** Vue en coupe du palier lisse testé

1 - coussinet testé, 2 - goupille de réglage, 3 - logement de coussinet, 4 - tourillon testé, 5- couvercle, 6 - joint torique, 7 - manchon distancé, 8 - écrou et 9 - arbre.

La surface et l'extrémité du thermocouple étaient d'environ  $2,2 \pm 0,15$  mm. La tête d'essai était située entre deux coussinets de support.

La charge radiale était exercée par un piston hydraulique à support hydrostatique placé dans un cylindre, avec une certaine pression d'huile hydraulique agissant sur celui-ci. Les surfaces du piston et du cylindre étaient séparées par un palier hydrostatique, garantissant la possibilité de générer une charge précise agissant sur le palier testé (les pertes par frottement entre le piston et le cylindre étaient négligeables).

Au cours des essais, il était nécessaire d'enregistrer avec précision le couple de frottement généré dans le palier lisse testé.

La tête d'essai transversale des bancs d'essai courants est généralement montée sur des roulements à rouleaux, et son déplacement angulaire est limité par le bras auquel le capteur de force est fixé. Cette solution amène le couple de frottement de glissement dans le coussinet testé à être d'une ampleur comparable au couple de frottement de coussinet généré dans les coussinet supportant la tête. En conséquence, le frottement mesuré coefficient à partir des valeurs réelles du palier testé, ce qui pourrait conduire à la formulation des conclusions fausses. Pour éviter un tel problème dans le PG21L, la tête d'essai était soutenue par un système unique de coussinet



hydrostatiques, permettant sa rotation libre avec pratiquement aucune force de frottement opposée, quelle que soit la valeur de la charge radiale agissant sur le coussinet testé.

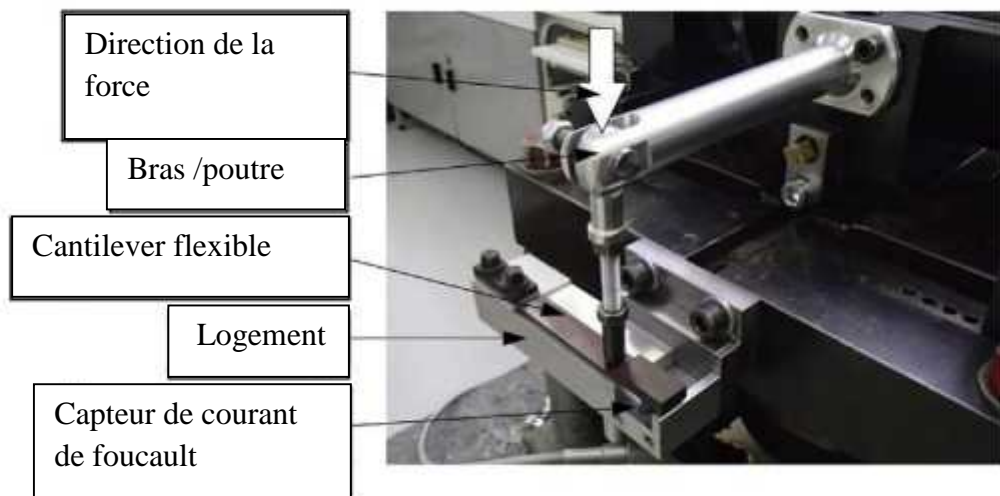
En général, la mesure précise et l'enregistrement du couple de frottement dans un palier hydrodynamique sont difficiles de parce que, au moment du démarrage, le coefficient de frottement dans le palier chargé atteint une valeur d'environ ,1 - 0,4 dans des conditions de lubrification sèche ou mixte. Cependant, après une courte période, lorsque la lubrification hydrodynamique complète est obtenue, cette valeur diminue à environ 0,003 - 0,008. Par conséquent, le système de mesure doit fournir simultanément une plage de mesure exceptionnellement large et une précision et une répétabilité très élevées. Les capteurs de force et de couple disponibles dans le commerce se sont avérés être d'une utilité limitée en raison de leurs plages de mesure fixes et définies et de leur grande vulnérabilité aux dommages provoqués par une surcharge. Par conséquent, un système exclusif de mesure du couple de frottement hautement précis a été développé, ce qui permet un ajustement facile de la plage de mesure du couple (Fig.3).

Ce système se compose d'un boîtier rigide contenant un capteur de courant de Foucault sans contact avec une plage de mesure de 2 mm. un cantilever de mesure flexible en acier à ressort est vissée sur la surface supérieure du boîtier. Le couple de frottement du coussinet est équilibré par la force exercée sur le porte-à-faux d'une longueur constante connue. Dès que cette force agit en raison du couple de frottement, le porte-à-faux se plie et sa distance au capteur change.

Cette conception garantit une invulnérabilité à la surcharge, car dans le cas d'une force extrême, la poutre repose en toute sécurité contre le boîtier, sans endommager le capteur.

Le réglage de la plage de mesure est réalisé avec la disponibilité de différents porte à faux de différentes valeurs de rigidité connues.

Avant chaque série d'essais, le système de mesure a été étalonné en accrochant des poids de masses connues.



**Figure 3** : Photo du système de mesure du couple de frottement.

#### II.4 principaux types de tests ont été réalisés

- Le type de test a été effectué pour déterminer les performances du coussinet sur une période plus longue.

La vitesse de rotation est constante (avec deux différentes variantes de 100 et 500 tours par minute), tandis que la charge change en trois étapes (dont chacune a duré 10 min): 1,5, 3 et 4,5 kN (correspondant à des charges spécifiques de 0,42, 0,84 et 1,26 MPa, respectivement). Au début de chaque essai, la température de l'huile a été réglée à environ 50°C.

Le banc d'essai entièrement contrôlé par ordinateur a permis de piloter les séquences d'essais avec les mêmes conditions de vitesse de rotation et de charges.

Le nombre de tests de réplication est égal à trois. L'écart-type de coefficient de frottement, les valeurs de couple et de température ont été calculés.

### II.5 Caractéristiques des paliers lisses examinés

L'étude a été réalisée avec des roulements à billes caractérisés par une géométrie fixe. L'arbre a été fabriqué en acier 42CrMo4 durci, qui est couramment utilisé, et le bronze CuSn10P a été appliqué pour le coussinet en raison de ses propriétés tribologiques.

Les paramètres géométriques des composants des paliers lisses sont répertoriés dans le tableau 3.

**Tableau 3 :** Paramètres géométriques des paliers lisses.

Paramètre	Unité	Valeur
Diamètre Tourillon	mm	80
Diamètre coussinet	mm	80,1
Longueur coussinet	mm	45
Diamètre du trou de lubrification	mm	8

Des tests ont été réalisés avec l'application de trois types de paliers lisses (Fig.4).

- tourillon lisse -coussinet lisse.
- tourillon texturé -coussinet lisse.
- tourillon lisse -coussinet texturé.



**Figure 4 :** Photographie du coussinet et de tourillon avec des surfaces non texturées.

Les surfaces lisses désignent les surfaces qui ne contiennent pas de cavités spécialement créées (alvéoles).

La surface lisse non texturée du tourillon a été fabriquée par un processus de meulage et sa rugosité, telle qu'évaluée par le paramètre Ra, était d'environ 0,15  $\mu\text{m}$ . La surface de glissement du coussinet non texturé a été traitée par tournage précis, et la valeur du paramètre de rugosité Ra était d'environ 0,2  $\mu\text{m}$ .

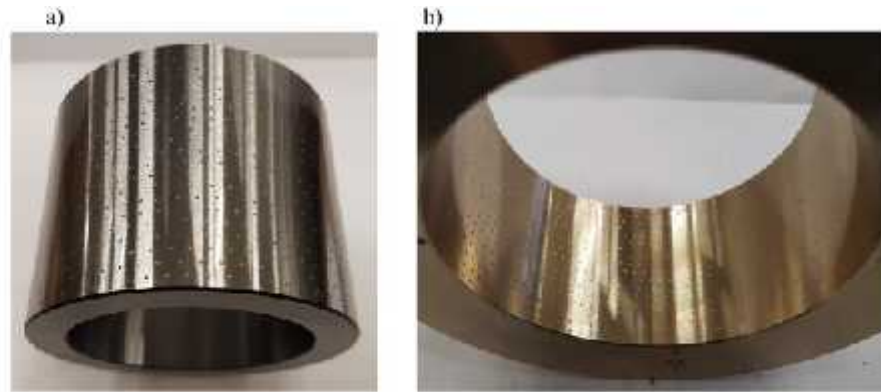
Le palier lisse avec des surfaces lisses de glissement a été supposé qu'une série de référence, avec lequel les résultats des tests de la série modifiées par texturation ont été comparés.

Dans cette étude, les auteurs ont sélectionné les dimensions de la texture en se basant principalement sur leur propre expérience et les résultats publiés dans [5-6].

Le rendement optimal tribologique des essais précédents a été obtenue pour les fossettes sphériques ayant une profondeur d'environ 50  $\mu\text{m}$  et une largeur de 0,7 - 0,9 mm. La zone de couverture des alvéoles se traduisant par une résistance à l'abrasion et une résistance au grippage supérieures, et une transition de régime la plus rapide, était comprise entre 3% et 10%, selon le type de paire glissante et les conditions de fonctionnement.

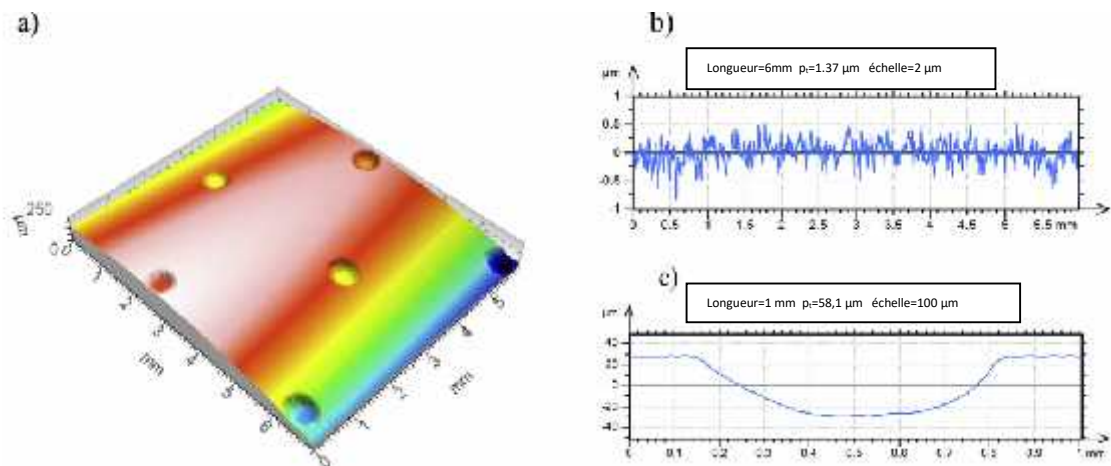
La texturation a été obtenue par l'application du processus de brunissage. Des têtes de polissage spéciales ont été utilisées pour les surfaces intérieures et extérieures.

Après le brunissage, les hauteurs de matière autour des cavités ont été éliminées par meulage ou tournage précis. Les textures sur les surfaces de glissement présentaient une forme sphérique (Fig.5).



**Figure 5 :** (a) Photographies du tourillon et (b) du coussinet avec des surfaces texturées.

Le diamètre des alvéoles sur la surface du tourillon en acier était d'environ 0,7 mm et leur profondeur était de 58  $\mu\text{m}$ (Fig.6).

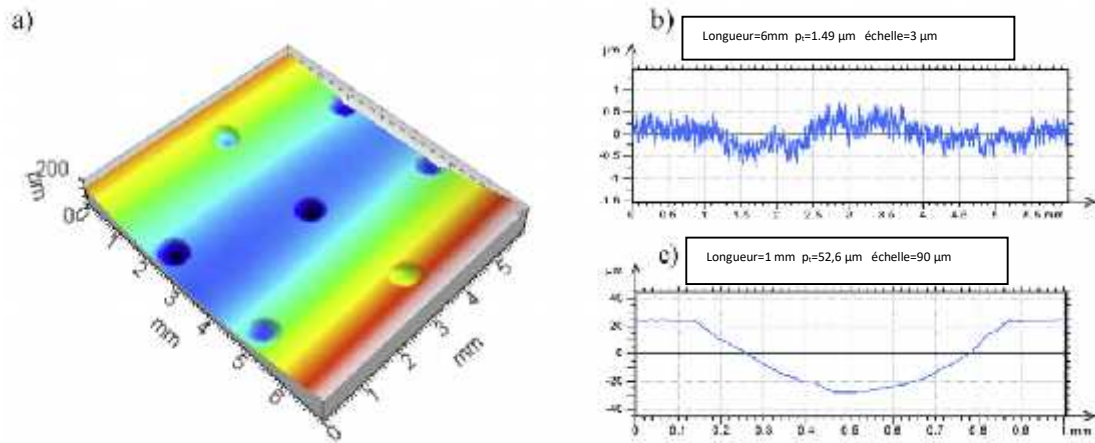


**Figure 6 :** (a) de la topographie de surface du tourillon en acier, (b) profil de rugosité entre les cavités, et (c) d'une cavité.

La couverture des cavités était faible, à environ 5,5%.

Une texture similaire a été préparée sur la surface d'appui.

La topographie de la surface du coussinet en bronze et les profils de rugosité sont présentés sur la (Fig.7).



**Figure 7 :** (a) de la topographie de la surface de coussinet en bronze, (b) profil de rugosité entre les cavités, et (c) d'une cavité.

Les alvéoles sur la surface portante en bronze étaient de forme sphérique.

La profondeur des cavités était légèrement inférieure à celle du tourillon en acier et égale à 53  $\mu\text{m}$  en moyenne.

Le diamètre des cavités était légèrement plus grand, à environ 0,75 mm, de sorte que le volume d'huile restant dans une seule fosse était comparatif.

La couverture des fossettes de la surface d'appui glissante était d'environ 6,3%,

Bien que les valeurs de rugosité moyenne  $R_m$  des deux surfaces de contact sont tout à fait similaires, l'ondulation diffère significativement et était encore bien visible sur les profils (fig. 6 b et 7 b).

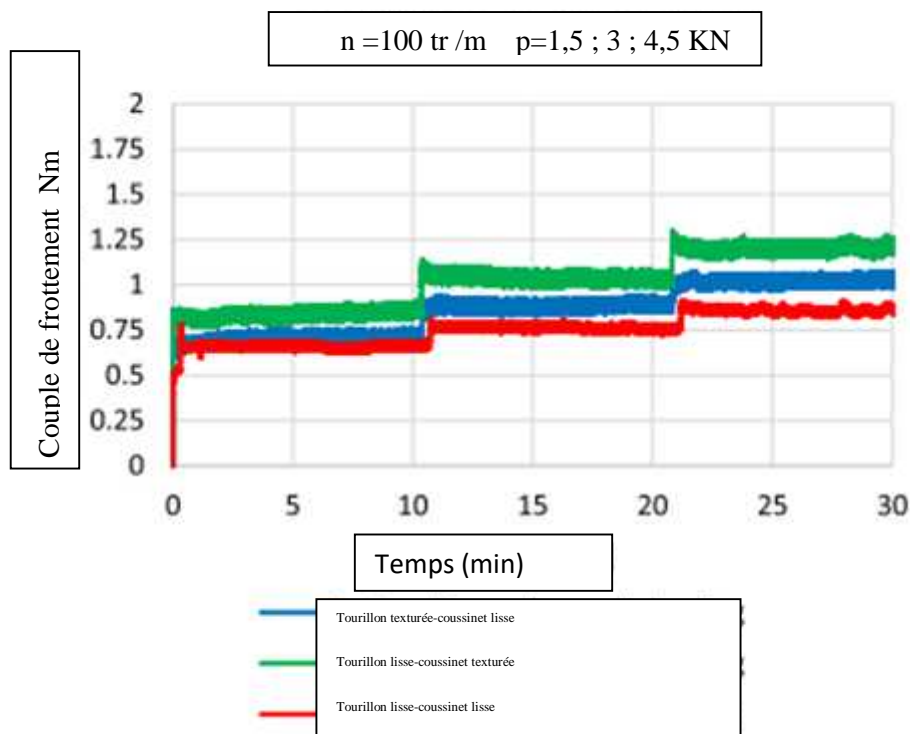
L'ondulation moyenne de la surface en acier du tourillon  $W_m$  était de 0,0528  $\mu\text{m}$ , mais la valeur d'ondulation du coussinet en bronze était de 0,168  $\mu\text{m}$ . Cette différence significative a été causée par le processus de tournage, tandis que le matériau en bronze, comme avec d'autres matériaux relativement doux, a été légèrement traîné.

### Effete de la texture à vitesse constante et charges diverses

Figure (8 – 9) présente les cours sélectionnés du couple de frottement, coefficient et température de huile à différentes des charges  $P$  dans la plage de 1,5 à 4,5 kN,

modifiés d'une manière par étapes, avec une vitesse de rotation de 100 tours par minute pendant les paliers lisses texturés et non texturés.

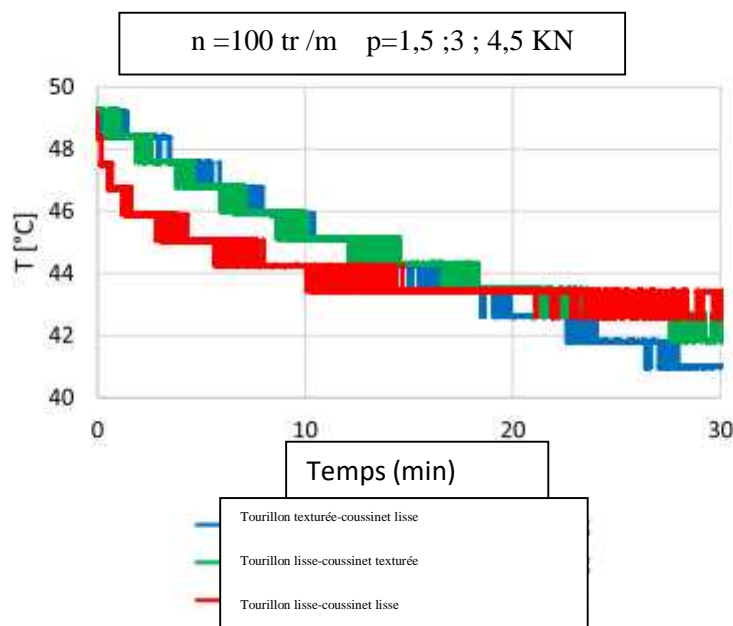
Le tableau 4 répertorie les valeurs de couple de frottement et de température après chaque étape de la charge appliquée pour la série testée avec des répétitions triples. Les valeurs de couple de frottement ont augmenté avec la charge pour toutes les configurations de paliers lisses testées (Fig 8).



**Figure 8 :** Valeurs de couple de frottement des paliers lisses examinés avec différentes textures de surface à une vitesse de rotation  $n = 100 \text{ tr/min}$ .

Le palier lisse était caractérisé par le plus petit frottement par rapport à la série texturée. La plus petite valeur de couple de frottement était de  $0,66 \text{ N m}$  en moyenne, obtenue à la plus petite charge de  $1,5 \text{ kN}$ . Après 10 min de fonctionnement dans ces conditions de fonctionnement, la température de l'huile s'est stabilisée à  $44^\circ\text{C}$  (Fig.8), après quoi la charge a été augmentée à  $3 \text{ kN}$  et le couple de frottement a augmenté à environ  $0,76 \text{ N m}$ , tandis que la température de l'huile a diminué d'environ  $0,5^\circ\text{C}$ .

À la charge la plus élevée de 4,5 kN, le couple de frottement du palier lisse a atteint 0,845 N m et la température de l'huile a diminué de 0,5 ° C supplémentaire. Les paliers lisses avec des modifie surfaces ont étaient caractérisé par une plus grande des valeurs de couple de frottement par rapport aux paliers lisses. Le palier glissant avec le tourillon texturé a atteint un couple de frottement d'environ 7% supérieur à la charge la plus faible que celui du palier lisse, mais l'augmentation du frottement à la charge maximale était de 20%. De plus, la température de l'huile diminuait constamment à 41°C sans stabilisation.



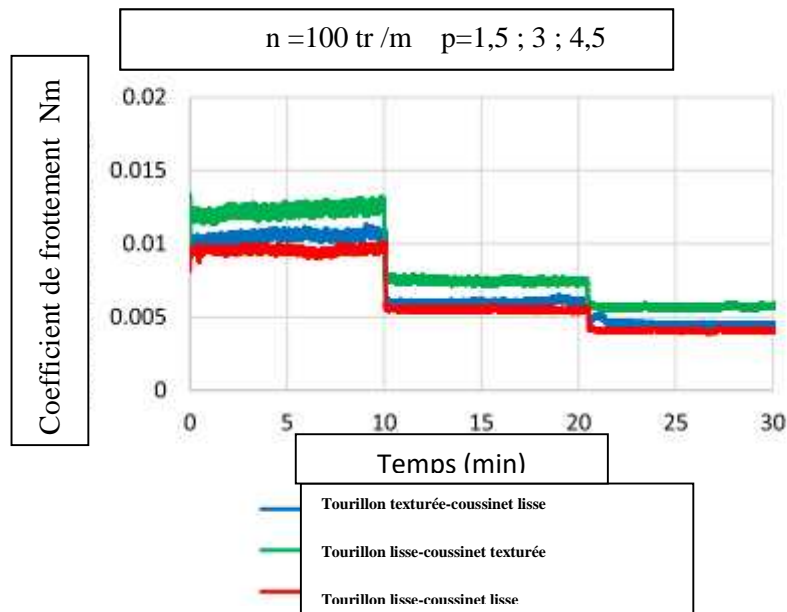
**Figure 9 :** Valeurs de température d'huile des paliers lisses examinés avec diverses textures de surface à une vitesse de rotation  $n = 100$  tr /min.

Un effet de texture de surface plus défavorable était observé dans le cas de cavités placées sur le coussinet fixe en bronze .

L'augmentation du couple de frottement par rapport au coussinet à glissement lisse était de l'ordre de 29% à une charge de 1,5 kN à 41% à une charge de 4,5 kN. Le plus grand couple de frottement obtenu à la plus grande charge de la série avec le coussinet texturé correspond à une coefficient de frottement de 0,006 Nm ( Fig. 10) , cela signifie que les paliers lisses testé sous le régime de lubrification



hydrodynamique. Bien que cela puisse être un niveau de frottement acceptable dans le palier glissant, lorsque l'on recherche la résistance de frottement minimale, on peut affirmer que ces cavités profondes ont un effet néfaste sur les performances du coussinet dans des conditions de fonctionnement stables.



**Figure 10 :** Valeurs du coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 100$  tours par minute.

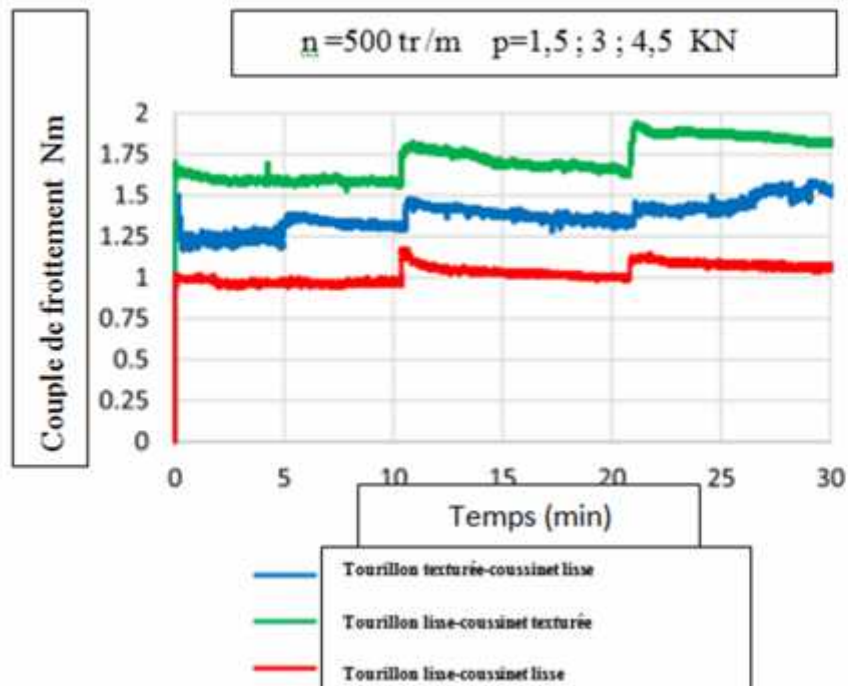
**Tableau 4**

Valeurs de couple de frottement et de température obtenues après chaque étape de test de 10 min à n = 100 tr / min.

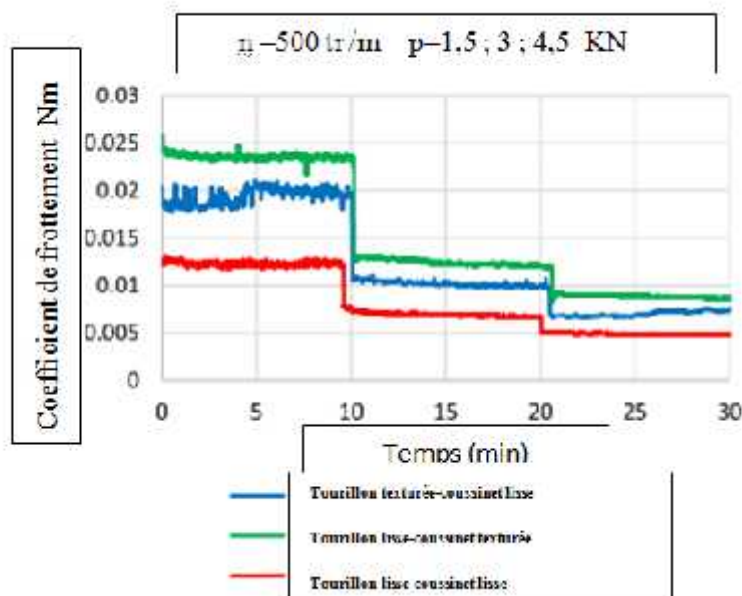
Series		Valeurs de couple de frottement et température à n=100 tr/min					
		t=10 min		t=20 min		t=30 min	
		C. frottement (Nm)	Température T (°C)	C. frottement (Nm)	Température T (°C)	C. frottement (Nm)	Température T (°C)
Tourillon texturée-coussinet lisse	1	0.71	45.2	0.88	42.5	1.018	40.9
	2	0.705	44.1	0.826	42.6	0.6447	42.0
	3	0.721	44.2	0.923	42.2	1.086	41.1
	Moyenne avec écart type	0.712 ± 0.008	44.5 ± 0.61	0.876 ± 0.049	42.43 ± 0.21	1.016 ± 0.071	41.33 ± 0.59
Tourillon lisse-coussinet texturée	1	0.868	45.5	1.053	43.5	1.197	42.1
	2	0.847	44.1	1.046	42.5	1.194	41.9
	3	0.846	43.5	1.011	42.2	1.195	41.2
	Moyenne avec écart type	0.854 ± 0.012	44.37 ± 1.05	1.04 ± 0.021	42.73 ± 0.68	1.197 ± 0.003	41.73 ± 0.47
Tourillon lisse-coussinet lisse	1	0.661	44.1	0.762	43.5	0.855	43.0
	2	0.685	44.2	0.782	43.5	0.856	43.0
	3	0.646	44.2	0.73	44.0	0.825	43.5
	Moyenne avec écart type	0.664 ± 0.020	44.17 ± 0.06	0.758 ± 0.026	43.67 ± 0.29	0.845 ± 0.018	43.13 ± 0.32

Les cavités sont d'environ 50µ m de profondeur, qui est égale exactement à la distance radiale, de sorte que le film d'huile a été interrompu, en particulier dans la zone convergente de l'espace libre, tandis que le porte charge superficielle a été quelque peu réduite par les cavités.

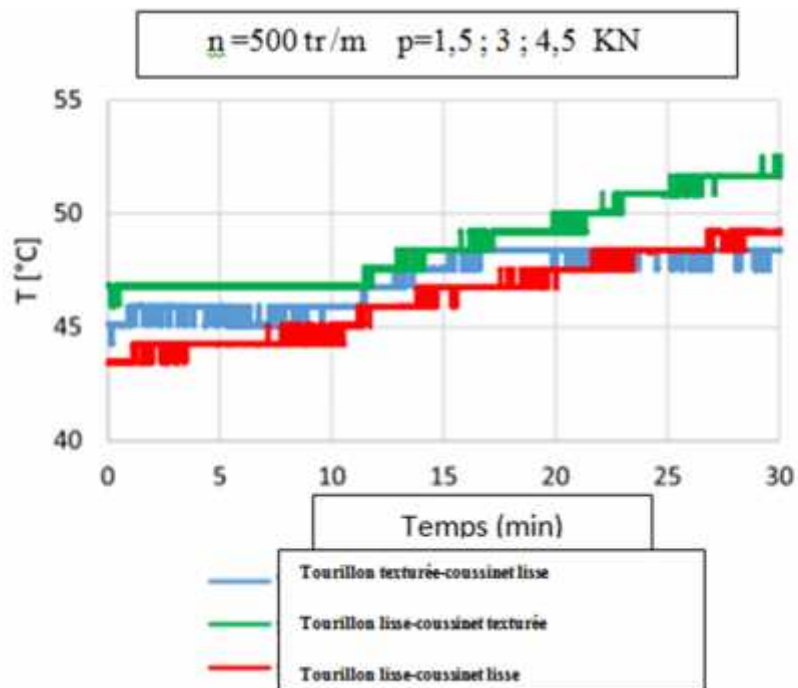
L'effet de la texturation de palier lisse sur la performance tribologique a également été examinée à une vitesse de rotation plus élevée de n = 500 tours par minute. Le couple de frottement, coefficient de frottement, et les valeurs de température d'huile des paliers testés avec des surfaces de glissement lisses et texturés à 500 tours par minute sont présentés dans les figures.( 11 - 13 ).



**Figure 11 :** Valeurs de couple de frottement des paliers lisses examinés avec différentes texture de surface à une vitesse de rotation  $n = 500$  tr / min.



**Figure 12 :** Valeurs de coefficient de frottement des paliers examinés avec différent texture de surface érent à la vitesse de rotation  $n = 500$  tours par minute



**figure 13 :** Valeurs de température d'huile des paliers lisses examinés avec de texture de surface à une vitesse de rotation  $n = 500 \text{ tr / min}$ .

Les valeurs du couple de frottement et de la température à chaque répétition, les moyennes et les écarts types pour les paliers lisses testés à une vitesse de rotation de  $n = 500 \text{ tr / min}$  sont énumérés dans le tableau 5 .

Tableau 5

Valeurs de couple de frottement et de température obtenues après chaque étape d'essais de 10 min à  $n = 500$  tr / min.

Série		Valeurs de couple de frottement et température à $n = 500$ (tr/min)					
		t=10 min		t=20 min		t=30 min	
		C. frottement (Nm)	Température T (°C)	C. frottement (Nm)	Température T (°C)	C. frottement (Nm)	Température T (°C)
Tourillon texturée coussinet lisse	1	1,281	47,5	1,39	50,5	1,51	51,1
	2	1,341	45,9	1,402	47,1	1,406	47,0
	3	1,355	45,0	1,412	48,3	1,428	48,3
	Moyenne avec écart type	$1,332 \pm 0,038$	$45,80 \pm 0,75$	$1,401 \pm 0,011$	$48,63 \pm 1,72$	$1,448 \pm 0,055$	$48,80 \pm 2,10$
Tourillon lisse- coussinet texturée	1	1,55	47,5	1,65	50,4	1,83	52,5
	2	1,581	49,8	1,785	52,3	1,771	53,5
	3	1,594	47,0	1,773	49,5	1,807	52,5
	Moyenne avec écart type	$1,58 \pm 0,019$	$48,10 \pm 1,49$	$1,73 \pm 0,066$	$50,73 \pm 1,43$	$1,80 \pm 0,030$	$52,63 \pm 0,58$
Tourillon lisse- coussinet lisse	1	0,99	44,5	1,02	47,5	1,05	49,1
	2	0,975	44,6	1,041	48,2	1,09	49,6
	3	0,975	45,5	1,038	48,0	1,089	49,8
	Moyenne avec écart type	$0,997 \pm 0,003$	$45,20 \pm 1,13$	$1,033 \pm 0,011$	$47,90 \pm 0,36$	$1,08 \pm 0,033$	$49,50 \pm 0,36$

Les valeurs de couple de frottement à la vitesse la plus élevée étaient supérieures à celles à 100 tr / min. La différence dans le couple de frottement est fonction de la charge appliquée, et dans le cas du palier lisse, est dans la gamme de 27% - 48%. Le changement de frottement dû à l'augmentation de la vitesse de rotation pour les surfaces texturées était encore plus grand, et les valeurs de couple de frottement des paliers lisses texturés étaient supérieures à celles des paliers lisses à 42% - 86%. La valeur du couple de frottement maximal a été atteinte pour une charge maximale de 4,5 kN pour la série à roulements stationnaires texturés. L'application de texture sur la surface de glissement a eu un effet plus nocif à une vitesse de rotation de 500 tr / min qu'à 100 tr / min. Les paliers lisses à surfaces de glissement lisses à la plus petite charge de 1,5 kN et à une vitesse de 500 tr / min étaient caractérisés par un couple de frottement moyen de 0,98 N m, tandis que la série avec le tourillon texturé présentait une valeur moyenne de 1,33 N m, et le L'application de coussinet texturés a entraîné une augmentation du couple de frottement de 61,4%. À des charges plus importantes, le couple de frottement augmente également d'une manière pas à pas, et par rapport à la série lisse base,

le différence était Approximativement 36% pour le journal texture. Cependant, pour la série avec coussinet texturé,

le couple de frottement a augmenté de 74% à une charge de 4,5 kN, Le plus grand couple de frottement a donné un coefficient de frottement élevé de 0,009 ( Fig.12 ), mais l'augmentation de la température de l'huile dégradée également les conditions de fonctionnement palier. À une vitesse de rotation inférieure de 100 tr / min, la température de l'huile dans le jeu de palier lisse était la plus élevée (43°C) de toutes les séries testées, et à une vitesse supérieure de 500 tr /min, la capacité de refroidissement du coussinet avec la présence de la texture était moins évidente. La série avec le tourillon texturé fonctionne à une de 48°C la température d'huile bilised sta- inférieure, tandis que la température de l'huile de la série lisses était légèrement plus élevée et atteint 49° C, mais a montré une tendance de rainage (Fig.13) .Les résultats opposés ont été obtenus pour le coussinet texturé, où la température de l'huile était de 3°C plus élevée que dans le jeu du coussinet lisse et la température a continué à augmenter.

A une vitesse de rotation plus élevée, Le cisaillement de la mince fluide film était plus grande, ce qui entraîne la température d'huile plus élevée et la frottement. La température de fonctionnement plus élevée dans le cas de l'application de coussinet texturé à une vitesse de rotation plus élevée de  $n = 500$  tr / min correspondait fortement aux résultats obtenus par Dadouche et al [ 7].

ces auteurs [6] ont testé les paliers texturés à une vitesse de 10000 tours par minute et obtenir une température de palier approximativement six -huit ° C supérieure à celle du palier tourillon lisse.

Il semble que les alvéoles placées sur la surface d'appui et la profondeur approximativement égale au jeu radial détériorent le coussinet performances à l' état d'équilibre déjà à 500 tr / min, de sorte que les textures profondes n'étaient pas appropriées pour les paliers lisses à moyenne et haute vitesse . Une petite quantité d'huile recueillie dans les cavités profondes créées sur la surface du tourillon a permis l'échange d'huile pendant la rotation de l'arbre, mais à très faible échelle, entraînant une baisse de température de seulement 1°C. Dans le cas des textures sur

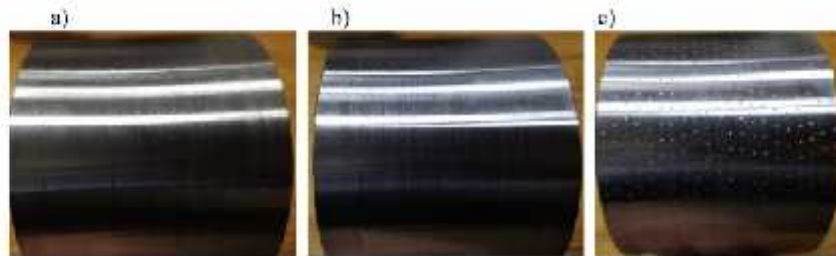
la surface d'appui stationnaire, il n'y avait pas d'amélioration dans le refroidissement parce que les cavités ont été remplies avec une petite portion d'huile qui bougeaient à peine, et les fossettes profondes affectés la génération de pression hydrodynamique.

La température de l'huile significative dans flue les valeur mesurées de couple de frottement. Par souci de la durée limitée du test et la température ambiante légèrement variable, la température mesurée était un peu différents pour chacune des séries, ou la répétition (Tableaux 4,5) Pour limiter l'effet du changement de viscosité de l'huile sur le couple et la frottement coefficient le palier lisse fonctionnant initialement jusqu'à ce que la température voisine de  $50^{\circ}\text{C}$  a été atteinte et le test a commencé. Diverses valeurs de la température au début de l'essai, représentée sur la (Fig.13), sont comprises entre  $43$  et  $47^{\circ}\text{C}$  ce qui, pour l'huile utilisée donne la différence dans le osity de l'huile de  $0,031$  à  $0,029\text{ N m}$  (environ 7%). L'analyse de la première étape du test pour le cas où la viscosité de l'huile est la plus petite (température  $47^{\circ}\text{C}$ ) le couple de frottement est alors le plus élevé et lorsque la viscosité de l'huile est la plus élevée (température  $43^{\circ}\text{C}$ ) le couple de frottement était le plus petit.

Cette confirme que les changements observés sur les valeurs du couple de frottement sont dues à la géométrie de surface des paires coulissantes.

## II.6 Analyse de surface après tests

Suite aux tests tribologiques, les surfaces du tourillon ont été soumises à des mesures et analyses. Des photographies des revues en acier sont présentées à la (Fig.14)



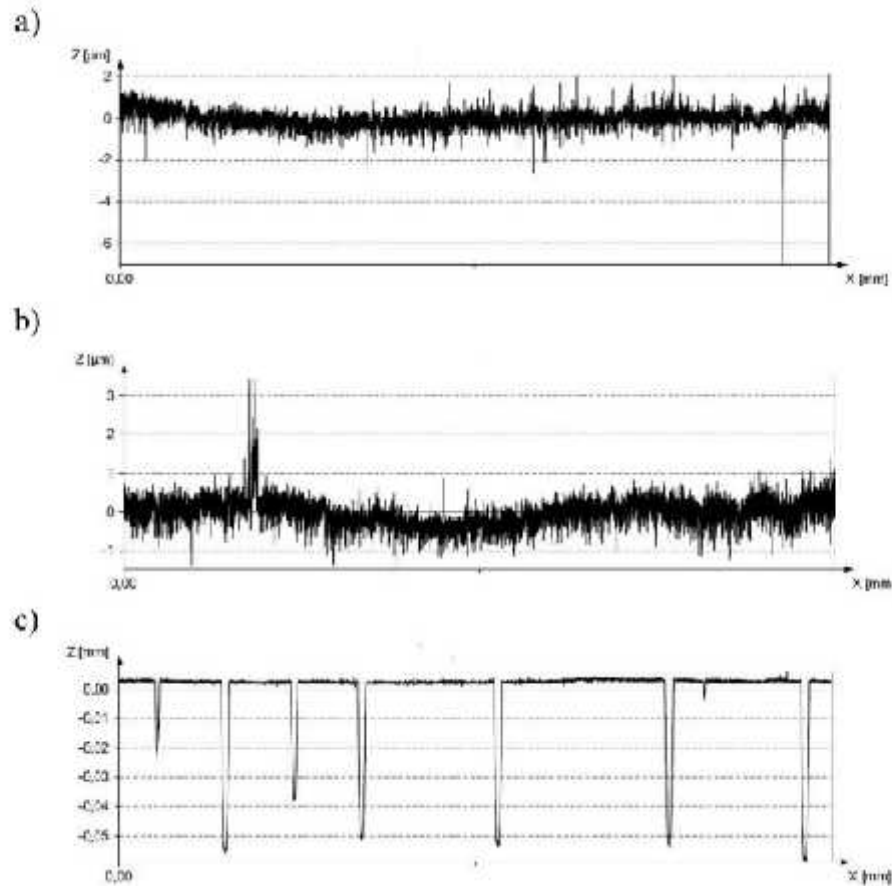
**Figure 14 :** Photographies de revues après essais tribologiques, agissant avec (a) palier lisse, (b) palier texturé et (c) palier lisse.

Les surfaces du tourillon après le test n'étaient pas caractérisées par tout symptôme d'usure particulier. Seules de légères marques ont été observées dans le sens de rotation de l'arbre.

Les marques les plus distinctes étaient visibles sur le tourillon lisse, qui coopérait avec le coussinet lisse, mais restaient par ailleurs comme dans ceux après un fonctionnement normal. La rugosité moyenne de surface  $R_a$  est passée de  $0,15 \mu\text{m}$  avant l'essai à  $0,23\mu\text{m}$  après les tests dans le cas de la série lisse de base. L'augmentation du paramètre  $R_a$  de la surface du tourillon qui a connecté avec le coussinet texturé était plus petite et égale à  $0,19 \mu\text{m}$ . En comparant les profils de surface (Fig.15), on peut observer que les surfaces de tourillons lisses qui ont connecté avec les coussinets lisses étaient caractérisées par une hauteur de profil environ deux fois plus grande

( $P_t = 9,11 \mu\text{m}$ ) comme celle du tourillon lisse qui s'est accouplé avec le coussinet texturé ( $P_t = 4,92 \mu\text{m}$ ). Ceci confirme que lors de la mise à l'arrêt et probablement au démarrage, un contact plus intense des heurts éléments finis coulissants a eu lieu que dans le cas de la demande de support texturé. En raison de l'huile collectée dans les alvéoles, le fonctionnement à basse vitesse n'était pas aussi rude. La longueur de mesure des profils de surface était de  $57,5 \text{ mm}$ , les profils représentent donc toute la zone de surface où le tourillon a connecté avec le coussinet ainsi que les zones des deux côtés où il n'y avait pas de contact avec le coussinet.





**Figure 15 :** Surface profiles des tourillons coopérant avec (a) palier lisse, (b) en appui texturé, et (c) palier lisse.

Il ressort clairement des profils de surface qu'il n'y avait pas d'usure visible sur les profils de revues en acier présentés.

L'usure de la surface du tourillon peut être déterminée uniquement par les changements d'irrégularités de surface, et la rugosité de surface a augmenté le plus dans le cas du

tourillon non texturé de la série de base. Des résultats similaires ont été observés sur la surface en acier non texturée des disques, qui a agi à de faibles vitesses avec les échantillons d'acier non texturés [8].

Ces surfaces non texturées ont été détériorées le plus et les fossettes rempli d'huile à forte intensité empêché métal à métal de contact de la série texturées.

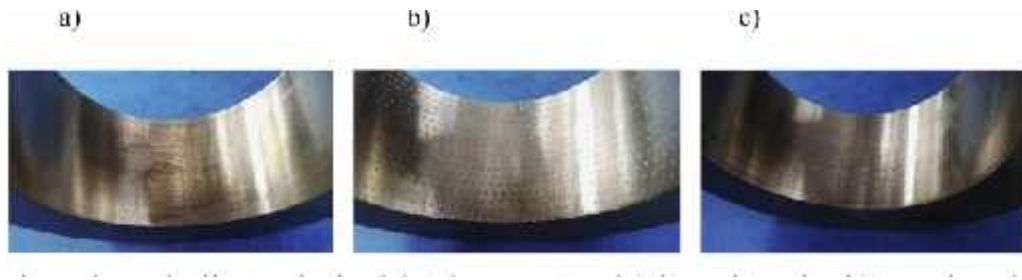
Les photographies des surfaces d'appui après les essais effectués sont présentées à la (Fig 16) Sur les surfaces d' appui du unidirectionnel lay-out de la normale des traces d'usure

ont été créées, de la même manière que sur le journal en acier. Les traces d'usure les plus visibles semblent être sur les roulements lisses de la série de base mais aussi de séries avec le tourillon texturé. Il confirme la surface profiles analyses ( Fig. 17). Les profils de surface d'appui de la longueur de mesure de  $42,5 \mu\text{m}$  à partir de la largeur d'appui de  $45 \mu\text{m}$  ont été réalisés. Les rayures d'usure les plus profondes se trouvent sur le coussinet lisse qui s'est accouplé avec le tourillon lisse ( Fig. 17 a). La profondeur maximale de la rayure sur la surface d'appui non texturée (série de base) est égale à  $13,62 \mu\text{m}$  . Les irrégularités de surface moyennes  $R_a$  ont augmenté plus de deux fois et ont atteint  $0,47 \mu\text{m}$ .

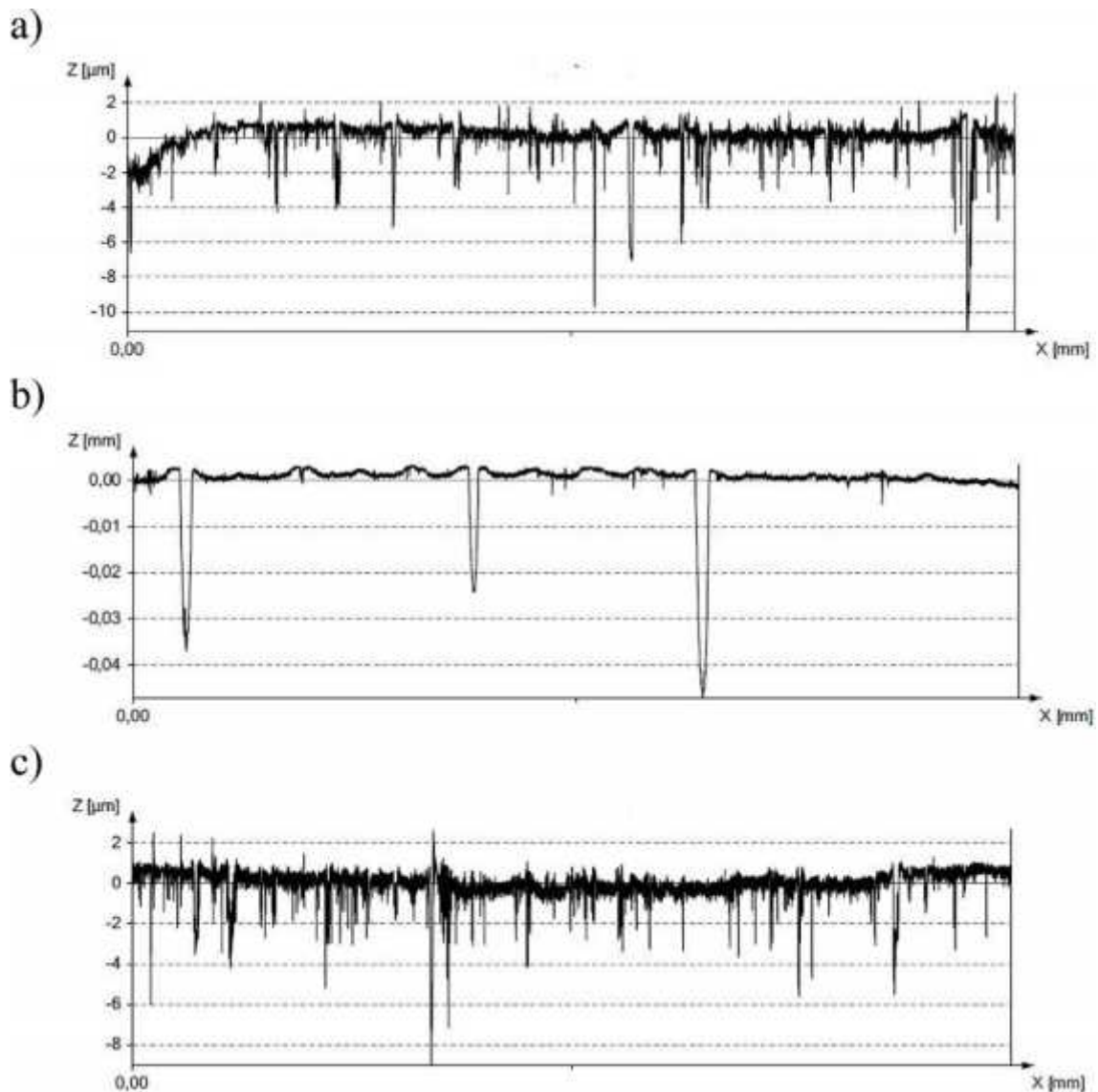
La profondeur des rayures entre les alvéoles ( Fig. 17 b) était la plus petite, jusqu'à  $7 \mu\text{m}$ . Bien que ces fossettes perturbent le fluide film et aggravent les performances d'appui à l'état d'équilibre, la couche d'huile dans les creux limite le contact des éléments de glissement au cours de l'arrêt du palier de tourillon du palier texturé. Le roulement lisse, qui fonctionnait avec le tourillon texturé, était caractérisé par des irrégularités de surface assez similaires à celles de la surface de base ( Fig.17 c). La profondeur maximale de rayure était égale à près de  $12 \mu\text{m}$  et la rugosité moyenne était environ deux fois plus élevée qu'avant le test. Les caractéristiques tribologiques obtenues pour la série avec le tourillon texturé étaient plus favorables que celles avec le coussinet texturé mais la surface d'appui lisse est beaucoup plus déviée.

Par conséquent, bien que le contact du coussinet en bronze lisse et du tourillon en acier texturé n'ait probablement pas été aussi durable, l'usure était plus intense en raison de la différence de dureté des matériaux.

Le tourillon dur avec la texture cause de l'usure de la surface d'appui de la dureté moindre matériau et une telle configuration de la texture sur le palier lisse ne doit pas être appliquée.



**Figure 16 :** Photographies de coussinet après les tests tribologiques, coopérant avec (a, b) des tourillons lisses et (c) un tourillon texturé.



**Figure 17 :** Surface profiles des paliers coopérant avec (a, b) des revues lisses et (c) revue texturé.

## II.7 Conclusions

Dans cette étude, une étude expérimentale a été menée pour démonstration l'influence de la texture sur la performances indiquées palier lisse.

Pour illustrer la possibilité d'une réduction considérable de frottement lors de la mise à l'arrêt période.

Le couple de frottement a également été examiné dans des conditions defonctionnement stables avec une vitesse constante et diverses charges. À la suite des expériences et des analyses menées,

En régime stationnaire à charge et vitesse stables, la série lisse était supérieure aux séries texturées. À une vitesse de 100 tours par minute, la différence dans le couple de frottement n'a pas été significative entre la série de base et ceux avec le tourillon texturé, mais avec le palier texturé est jusqu'à 41% supérieure à celle du palier lisse. A des vitesses supérieures à 500 tours par minute égale, la différence dans le couple de frottement de la série texturés et l'une de base a augmenté de 74%. Les dimensions de la texture dans les surfaces de glissement testées étaient assez grandes, et dans les état d'équilibre des conditions, perturbé le coin du fluide de telle sorte que le palier de tourillon opérant principalement dans la lubrification hydrodynamique ne doit pas contenir des cavités. Les paliers lisses dans les machines avec des démarrages / arrêts fréquents pourraient bénéficier de la texture. La mise en route du palier à texture nécessite des tests supplémentaires pour déterminer les performances.

Ces expériences et analyses ont démontré que la texture des surfaces de glissement est controversée, car dans certaines conditions de fonctionnement, elle peut améliorer les performances des paliers lisses, mais dans d'autres elle peut dégrader les performances. Il est également possible de développer la texture afin de déterminer les dimensions de texture qui seront optimales pour des applications spécifiques, La dimension importante des cavités est leur profondeur.

Le but des recherches expérimentales futures sera d'examiner les performances des coussinet avec une faible profondeur des cavités.



### III. Synthèse

A partir de l'expérience qui a été faite sur les paliers lisses et les différents composants de ce dernier, qui est le tourillon en acier durci avec une composition chimique de 42CrMo4 et avec un diamètre égale 80 mm avec deux surfaces différentes, le premier tourillon été avec une surface texturé et le deuxième tourillon avec une surface lisse.

On a aussi le deuxième composant qui est le coussinet en bronze avec une composition chimique de CuSn10P, et avec un diamètres plus grand par rapport au tourillon qui égale a 80,1 mm, puisque durant l'assemblage il faut qui 'il y un jeu entre le tourillon et le coussinet , dans ce cas il a choisit deux surfaces différentes ,le premier coussinet été avec une surface lisse et le deuxième coussinet avec une surface texturé.

Dans cette expériences il ya, trois échantillons différents a tester entre le tourillon et le coussinet, sont comme suivant :

- 1- tourillon texturé -coussinet lisse.
- 2- tourillon lisse -coussinet texturé.
- 3- tourillon lisse -coussinet lisse.

Sur le banc d'essai PG21L qui conçu a testé les trois échantillons proposé , pour la détermination des caractéristiques tribologiques des paliers lisses, a cet effet ils ont fait deux expériences a des vitesses de rotation différentes la première c'était a une vitesse égale 100 tours par minute et la deuxième a une vitesse égale 500 tours par minute .

Sur cette expérience des résultats ont été enregistré a l'aide d'un micro intégré sur la plateforme d'essai, a la fin de l'expérience un ensemble des résultats a été obtenus.

Les différents paramètres qui ont été enregistrés sur les essais sont ; la température de l'huile le coefficient et le couple de frottement dans les trois échantillons ,à des vitesses de rotation du tourillons différentes. Tel que :

Essai 1 : la vitesse de rotation égale 100 tours par minute

Essai 2 : la vitesse de rotation égale 500 tours par minute

A l'aide des expériences qui ont été réalisées sur le banc d'essai PG21L qui a été conçu et testé les trois échantillons proposés.

#### III.1 Objectif du travail

Notre travail consiste à analyser les résultats trouvés sur l'ensemble des essais qui ont déjà été faits, afin d'identifier le coussinet en bronze le plus fiable et le tourillon qui convient à ce dernier, cela veut dire qu'ils sont les caractéristiques tribologiques de coussinet et le tourillon ; pour que le coussinet en bronze peut avoir une meilleure résistance au frottement, qui est provoqué par la vitesse de rotation du tourillon en acier durci à des différentes vitesses et des charges exercées sur le coussinet en bronze.

Aussi on s'intéresse au phénomène de l'usure du coussinet en bronze avec le tourillon en acier durci. À cet effet on va utiliser les résultats trouvés dans les expériences qui ont déjà été faites sur le banc d'essai PG21L, afin d'analyser les résultats trouvés durant les tests, pour qu'on puisse identifier le coussinet le plus performant et le tourillon qui lui convient.

D'après les tests réalisés sur le banc d'essai PG21L, ils ont fixé un ensemble de paramètres

tel que :

1. la charge appliquée sur le tourillon (1,5 ; 3 ; 4,5 KN).
2. La vitesse de rotation du tourillon (100 ; 500 tours par minute).
3. Le temps (l'intervalle à chaque instant pour prendre des nouvelles valeurs) (10 ; 20 ; 30 min).

Après avoir fixé tous ces paramètres ; à la fin de ces tests ils arrivent à enregistrer toutes les informations sur les trois échantillons, quand peut servir pour analyser les paliers lisses (tourillon – coussinet) le plus performant et de déduire le coussinet en bronze le plus fiable.

#### III.2 Analyse et discussion

A fin de pouvoir déterminé le coussinet en bronze le plus fiable ( performant ) ,on établie une analyse approfondi sur les résultats obtenu sur les paliers lisses ( coussinets – tourillon ) testé.

Et aussi on réalisons des étapes qui va nous conduit a déterminer le coussinet le plus performant et avec le tourillon adéquate.

#### III.3 Extraction des paramètres qui agisse sur les comportements des paliers testé (tourillon – coussinet)

##### III.3.1 Le premier test à une vitesse $n=100$ tr /min

Pour ce test on va chercher les paramètres qui nous aide a déterminé le palier lisse (tourillon –coussinet) le plus préformant, on utilisant les résultats trouvé dans le tableau 4, et les deux figures :

**Figure 8 :** Valeurs de couple de frottement des paliers lisses examinés avec différentes textures de surface à une vitesse de rotation  $n = 100$  tr / min.

**Figure 10 :** Valeurs du coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 100$  tours par minute.

On va tracer un tableau qui peut nous indiqué les différents valeurs des couples de frottement de chaque paliers lisses ( tourillon – coussinet ), a une vitesse de rotation égale a 100 tours par minute , et pour des durées variables :  $t=10$  min ;  $t=20$  min ;  $t= 30$  min.

**Tableau 6 :**

Valeurs de couple de frottement après chaque étape de test de 10 min à  $n = 100$  tr / min

Séries	Couple de frottement (Nm) $t=10$ min	Couple de frottement (Nm) $t=20$ min	Couple de frottement (Nm) $t= 30$ min
tourillon texturé - coussinet lisse.	$T_f = 0,712$	$T_f = 0,876$	$T_f = 1,015$
tourillon lisse - coussinet texturé.	$T_f = 0,854$	$T_f = 1,04$	$T_f = 1,197$
tourillon lisse - coussinet lisse.	$T_f = 0,664$	$T_f = 0,758$	$T_f = 0,845$



Le but de tracer ce tableau c'est de comparer les valeurs des couples de frottements entre les trois paliers lisses, afin de déterminer l'évolution des couples de frottement des paliers lisses

(tourillon – coussinet) et de déduire le couple le plus élevé parmi ces trois paliers pour les comparer entre eux.

#### Remarque1

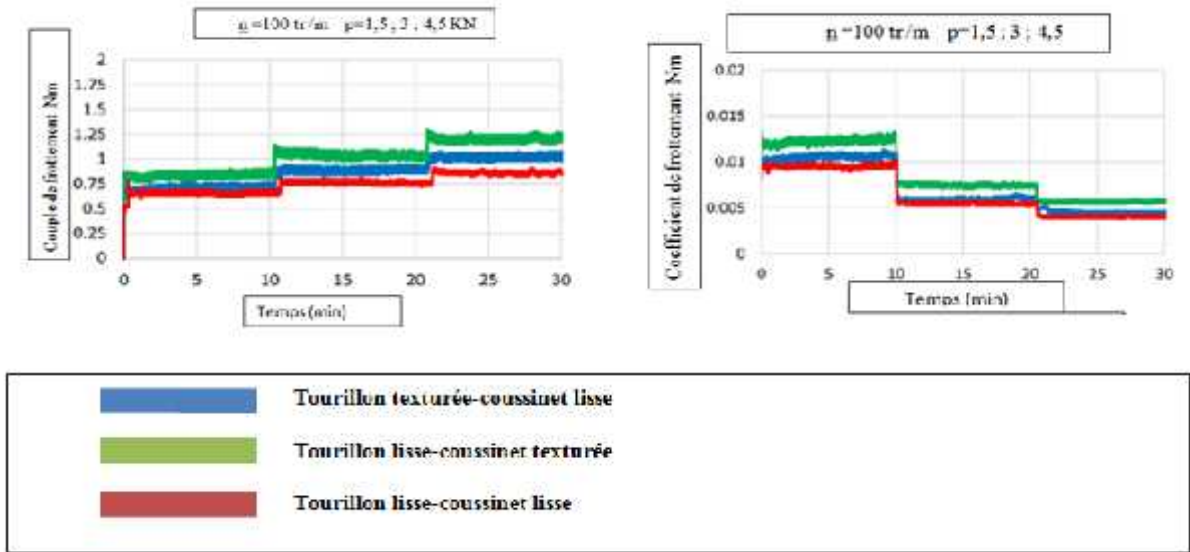
d'après ce tableau on remarque que, la valeur la plus élevée de couple de frottement a été enregistrée sur le palier lisse (tourillon lisse -coussinet texturé), pour une valeur de  $T_f = 1,197 \text{ Nm}$ , à une vitesse de 100 tr/min.

#### a) Analyse des graphes

La figure (18) illustre la relation entre le couple et le coefficient de frottement des trois échantillons testés : (tourillon texturé -coussinet lisse ; tourillon lisse -coussinet texturé ; tourillon lisse -coussinet lisse), à des différents instants :  $t=10 \text{ min}$  ;  $t=20 \text{ min}$  ;  $t=30 \text{ min}$ . et aussi avec des charges variables :  $P = 1,5 ; 3 ; 4,5 \text{ KN}$ . à une vitesse égale à 100 tr/m.

#### Remarque2

on constate que le couple de frottement augmente par contre le coefficient de frottement diminue, à des instants bien précis, on concluons que à chaque fois le couple augmente le coefficient de frottement diminue, à cet effet on déduit que si le coefficient de frottement est petit, l'impact entre les deux surfaces est minimal, et cela implique que le taux d'usure est faible.



**Figure 18 :** Valeurs de couple de frottement et coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 100$  tours par minute.

#### III.3.2 Le deuxième test à une vitesse $n=500$ tr /min

Pour ce test on va chercher les paramètres qui nous aide a trouve le palier lisse (tourillon – coussinet) le plus préformant, on utilisant les résultats trouvé dans le tableau 5, et les deux figures :

**Figure 11 :** Valeurs de couple de frottement des paliers lisses examinés avec différentes textures de surface à une vitesse de rotation  $n = 500$  tr / min.

**Figure 12 :** Valeurs du coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 500$  tours par minute.

On va tracer un tableau qui peut nous indiqué les différents valeurs des couples de frottement de chaque paliers lisses (tourillon – coussinet), a une vitesse de rotation égale a 100 tours par minute, et pour des durées variables :  $t=10$  min ;  $t=20$  min ;  $t= 30$  min.

**Tableau 7 :**

Valeurs de couple de frottement après chaque étape de test de 10 min à  $n = 500$  tr / min

Séries	Couple de frottement (Nm) $\tau=10$ min	Couple de frottement (Nm) $\tau=20$ min	Couple de frottement (Nm) $\tau=30$ min
tourillon texturé - coussinet lisse.	$T_f = 1,332$	$T_f = 1,401$	$T_f = 1,448$
tourillon lisse - coussinet texturé.	$T_f = 1,58$	$T_f = 1,73$	$T_f = 1,80$
tourillon lisse - coussinet lisse	$T_f = 0,977$	$T_f = 1,033$	$T_f = 1,08$

#### Remarque 3

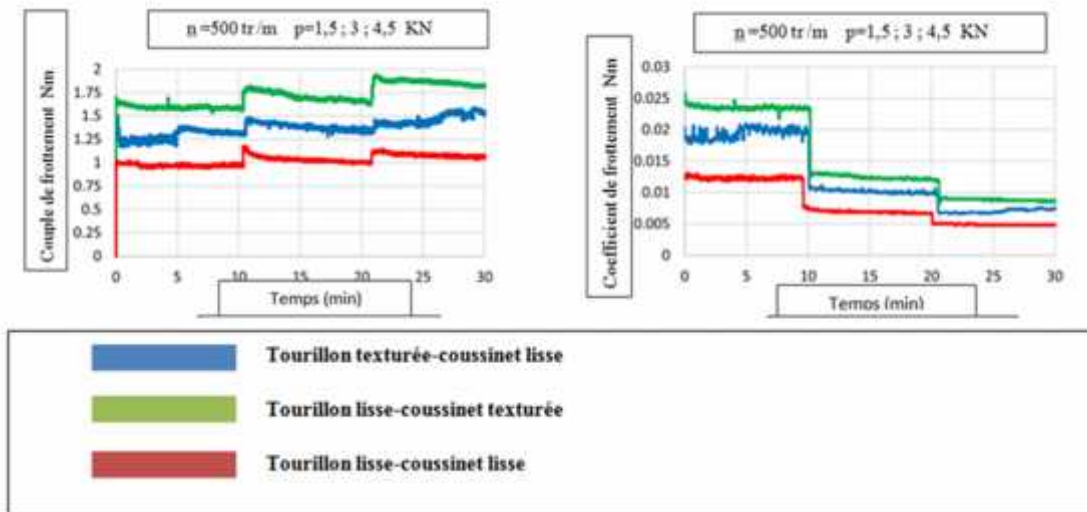
D'après ce tableau on remarque que, la valeur la plus élevée de couple de frottement a été enregistré sur le palier lisse (tourillon lisse -coussinet texturé), pour une valeur de  $T_f = 1,80$  Nm , a une vitesse de 500tr /min.

#### b) Analyse des graphes

Sur la figure (19) on constate que à une vitesse de rotation égale à 500 tours par minute les couples de frottements augmentent, cela veut dire que l'augmentation de la vitesse provoque une croissance directe sur le couple de frottement , et par conséquent le coefficient de frottement décroît plus rapidement par rapport à la vitesse précédente qui est à 100 tours par minute .

#### Remarque 4

On remarque que la croissance de la vitesse de rotation entre les deux surfaces influence directement sur le coefficient de frottement, et cela veut dire le taux d'usure de ces deux surfaces. seront moins faibles par rapport à la vitesse précédente qui est à 100tr/min.



**Figure 19 :** Valeurs de couple de frottement et coefficient de frottement des paliers examinés avec divers texture de surface à la vitesse de rotation  $n = 500$  tours par minute.

D'après les figures 18 et 19 et les deux tableaux (6 ;7 ), on remarque a chaque fois la vitesse de rotation augmente ,on constat que le couple de frottement augmente ,par contre le coefficient de frottement diminue .

Donc si le coefficient de frottement décroît, cela veut dire que les deux surfaces seront moins impacté et le taux d'usure va diminuer.

#### III.4 CONCLUSION

Notre objectif c'est de déduire le coussinet le performant ( fiable ) et le tourillon adèquate a ce dernier.

Afin de déterminé ce coussinet on a procédé a des analyses de l'ensembles des paramètres ; qui peut nous idiqué qui est le palier le plus performant parmit les paliers lisses testé .

Aprés les deux expériences quand vient de voir dans le chapitre deux, qui consiste a testé les trois paliers lisses a des differentes vitesses de rotation ,la première a 100tr/min et la deuxième a une vitesse de 500tr/min, on a utilisé les resultats obtenues pour identifier le palier le plus fiable .

A la fin de l'analyse des resultats enregistré sur les deux tableaux (6 ;7) et les deux figures (18 ;19) ,on arrive a déduire que chaque fois la vitesse augmente le couple de frottement aussi augment, par contre le coefficient de frottement diminue ,a partir de ces paramètres on déduit que pour un coefficient de frottement faible implique que les deux surfaces sont moins frotté ; et par conséquence le taux d'usure va diminué automatiquement.

On conclurons que le coussinet le plus fiable on le déduit a partir du coefficient de frottement le plus petit,puisque il y'a moins de taux d'usure par rapport aux autres.dans ce cas le plus fiable c'est le palier (tourillon lisse – coussinet texturé ) ;donc le coussinet le plus performant (fiable), c'est celui qui texturé pour un tourillon lisse .

## **Conclusion générale**

Dans ce mémoire, nous avons traité le sujet sur les performances des coussinets en bronze, on se basons sur l'ensembles des paramètres qui peuvent aider à déterminer le coussinet le plus performant et plus robuste.

On a effectué une analyse approfondie sur un article scientifique qui a fait l'objet d'une étude expérimentale des effets de la texture de surface sur la fiabilité des paliers lisses,

Les informations qu'on a extrait de l'article scientifique, nous ont permis de vérifier l'ensemble des paramètres qui influent sur les performances (fiabilité) des paliers lisses examinés.

Le couple et le coefficient de frottement de ces trois échantillons (tourillon – coussinet) nous a permis de choisir le coussinet le plus fiable en analysant la relation entre les deux paramètres qui va nous ont orienté a déterminer le coussinet le plus robuste.

Le coefficient de frottement c'est le paramètre essentiel pour déterminèr la nature des contacts qui se produisent entre les deux surfaces en mouvement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MASPEYROT.P « comportement dynamique des paliers de vilebrequin influence des défaut de forme et de mésalignement »thèse de doctorat Poitiers 1989.
- [2] (<https://www.techne.fr/a-propos/actualites/61-coussinnet-de-glisement-une-gamme-complete-pour-repondre-a-tous-vos-besoins>)
- [3] Présentée Par Choubeila boubechou université des frères mentouri Constantine faculté des sciences de la technologie département de génie mécanique, (contribution a l'étude du comportement tribologique des couples glissants acier-acier et acier-bronze) thèse doctorat 2015.
- [4] M. Godet, The third body approach: a mechanical view of wear. *Wear*, 100, 437-452 (1984).
- [5] Pawlus P, Galda L, Dzierwa A, Koszela W. Abrasive wear resistance of textured steel rings. *Wear* 2009;267:1873–82.
- [6] Galda L, Pawlus P, Sep J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve. *Tribol Int* 2009;42:1505–12.
- [7] Dadouche A, Conlon MJ, Dmochowski WM, Koszela W, Galda L, Pawlus P. Effect of surface texturing on the steady-state properties and dynamic coefficients of a plain journal bearing: experimental study. *Proceedings of ASME turbo expo 2011*, Vancouver, BC, Canada; June 6–10. 2011.
- [8] Galda L, Sep J, Prucnal S. The effect of dimples geometry in sliding surface on the tribological properties under starved lubrication conditions. *Tribol Int* 2016;99:77–84.