

I.1 Historique

Le nom tribologie, créé en 1966, vient du Grec "**τριβειν**" Tribein : frotter, et "**λογος**" logos : parole, étude ou science ; ainsi la tribologie est l'étude ou la science, du frottement. Plus généralement la tribologie regroupe l'étude de la lubrification, du frottement et de l'usure des éléments de machine.

Au la période préhistorique Les premiers paliers fabriqués par l'homme sont sans doute les crapaudines de porte qui consistaient en un axe en bois tournant à l'intérieur d'un creux pratiqué dans du bois ou dans une pierre. Des éléments en pierre datés de 2500 ans avant J. C. ont ainsi été retrouvés en Mésopotamie (fig. I. 1).

De même, la fabrication des poteries a conduit très tôt, vers 4000 ans avant J. C. à la réalisation des tours de potier qui comportaient un pivot ; ce pivot pouvait être en bois, en pierre ou même en terre cuite. Ainsi, un pivot de tour en pierre, daté de 2000 ans avant J. C., a été retrouvé à Jéricho. Ces pivots étaient sans doute lubrifiés à l'aide soit de bitume soit de graisse animale. [1]

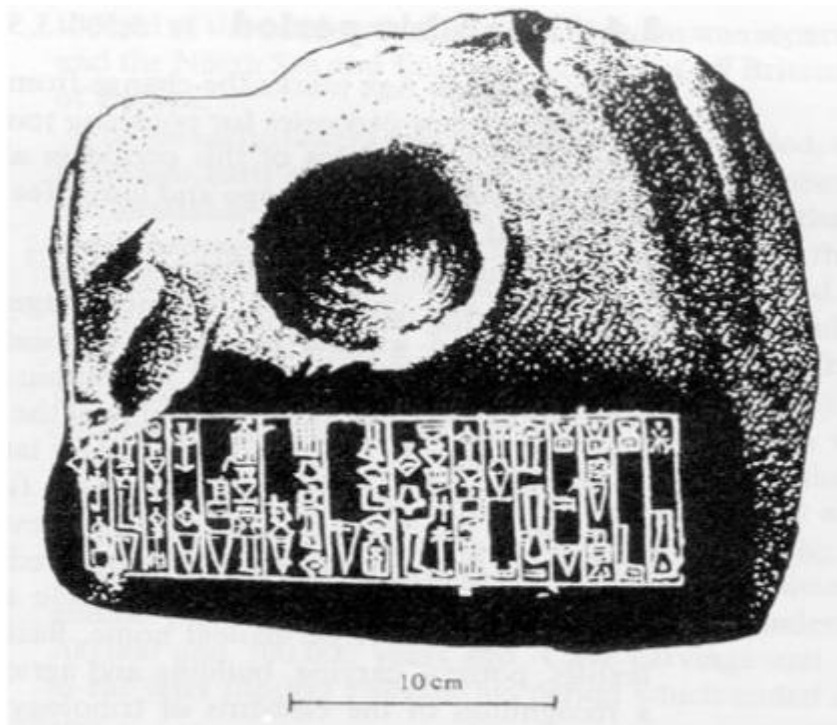


Fig. I. 1 Crapaudine de porte, Mésopotamie 2500 ans avant J. C. [1].

Pour transporter les lourdes charges, les Egyptiens faisaient glisser celles-ci sur des chemins réalisés sans doute en bois, et lubrifiés abondamment à l'avant de l'objet à déplacer. Plusieurs bas-reliefs montrent cette méthode de transport. Le plus ancien provient de la tombe de Saqqara et date de 2400 ans avant J. C. et montre le déplacement de la statue de Ti. On voit très clairement un homme placé devant la statue, et versant du liquide, sans doute de l'eau ou de l'huile, pour faciliter le glissement ; c'est le premier exemple connu de la lubrification. Un autre bas-relief daté de 1880 ans avant J. C., et provenant de la tombe de TchutiHetep à El Bersheh montre le même procédé de transport. Cependant l'homme qui verse de l'eau est maintenant sur le piédestal de la statue et non plus devant où il risquait de se faire écraser ; l'importance de la lubrification est ainsi reconnue.

La roue existait évidemment à la même époque en Egypte mais le chariot n'était utilisé que pour le transport des objets légers ou pour la guerre ; il semble que vers 1400 ans avant J.C. la graisse de mouton ou de boeuf ait été utilisée pour lubrifier les paliers des roues de chariots.

Au la période grecque et romaine les Grecs et les Romains ont développé l'usage de la roue ; ils connaissaient l'emploi des huiles végétales et animales comme lubrifiant ainsi que celui du bitume et des huiles de pétrole.

Par ailleurs, les Grecs ont inventé l'engrenage ; la vis serait due à Archytas et Aristote, Archimède et d'autres auteurs moins connus décrivent le principe de différents engrenages. De même Heron d'Alexandrie utilise l'arbre à came. En fait, les Grecs disposaient de tous les éléments nécessaires aux grands progrès techniques sauf le système bielle manivelle inventé au XIV^e siècle. Cependant il n'y eut pas réellement de développement du machinisme pour différentes raisons dont les principales sont sans doute le manque de bois et d'énergie hydraulique, les problèmes de transport liés à un réseau routier insuffisant, l'existence de l'esclavage et surtout une forme de pensée qui ne reconnaît que le raisonnement pur et la démonstration rigoureuse et ne laisse pas de place à la logique expérimentale.

Les Romains ont utilisé et développé les techniques mises au point par les Grecs. Des progrès importants ont été réalisés pour produire l'huile d'olive et pour moulinier le blé, ainsi les moulins à eau ont été utilisés vers 120 ans avant J. C. Un exemple intéressant est le

Trapetum dont plusieurs exemplaires ont été retrouvés dans les fouilles d'Olyntha (Ve siècle avant J. C.) et qui permettait d'écraser et de dénoyauter les olives (fig.I.2). Il comportait deux meules (orbis), hémisphériques, dressées verticalement et soutenues par un axe horizontal en bois (Cupa) tournant autour d'un pivot central (Columella). La meule gisante (Mortarium) était une cuve de pierre dont les parois épousaient la forme des meules courantes. On note aussi la présence d'une bague (Cunica) sans doute en métal qui évitait une usure trop rapide de l'arbre en bois ; c'est un des premiers exemples de palier. [1]

Du point de vue technologique le XVIIIe siècle qui correspond au tout début de la révolution industrielle voit la réalisation de nombreuses machines utilisant des paliers lisses et même des roulements.

Le XIXe siècle a été marqué par des développements très importants dans tous les domaines et en particulier en Tribologie.

En 1917, Lord Rayleigh fut le premier à présenter l'analyse d'un système hydrostatique et à calculer la charge et le couple de frottement d'une butée hydrostatique axiale.

Aujourd'hui, les systèmes hydrostatiques sont utilisés dans les machines-outils de précision et les appareils de mesure ainsi que dans les cas où le mouvement relatif des surfaces ne permet pas de créer une portance suffisante pour assurer un bon fonctionnement du mécanisme (paliers hybrides). Une application peu connue mais remarquable des paliers hybrides, est le palier guide des pompes primaires des réacteurs nucléaires N4 dont la durée de vie doit excéder 30 ans. [1].

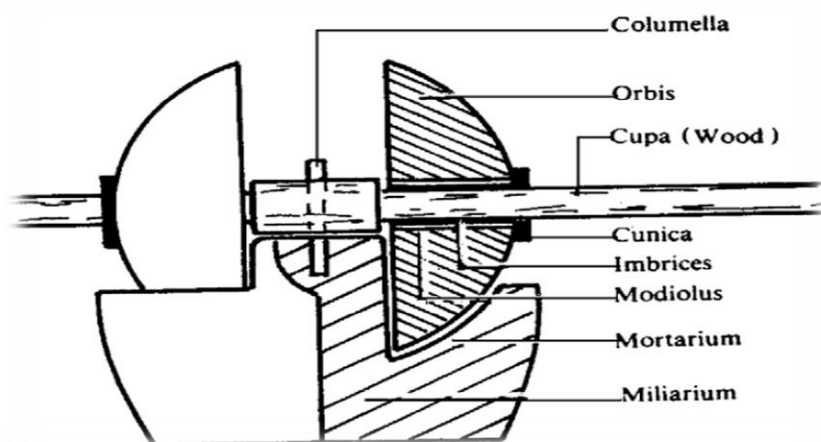


Fig. I. 2 Un trapetum pour écraser les olives. [2]

I.1. Définition

Les paliers sont des éléments de machines qui servent à supporter et à guider des axes ou des arbres soit dans la direction radiale paliers.

Deux grandes familles de paliers existent : les paliers lisses et les paliers à roulements.

En générale, un palier est défini comme la partie fixe d'une machine qui supporte une partie mobile.

1.2 Dynamique des rotors

La dynamique des rotos est l'étude de la stabilité des mouvements des machines tournantes. Elle joue un rôle important dans la sécurité et l'amélioration des performances systèmes.

Au fur et à mesure que la vitesse de rotation d'un objet tournant augment, son niveau de vibration traverse souvent un seuil critique. Cette évolution est généralement excitée par un déséquilibre de la structure tournante, et si l'ampleur de la vibration à ces vitesses devient excessive, une défaillance catastrophique peut se produire. [3]

1.3. Classifications des rotors

Un système de rotors peut être constitué de disque et d'aubages de forme complexe, dont l'analyse des vibrations requis un modèle mathématique approprié simplifié. Les rotors des machines tournantes sont classés en fonction de leurs caractéristiques, comme suit :

➤ Rotors rigides

Si la déformation de l'arbre de rotation est négligeable dans la plage de vitesse de fonctionnement, il est appelé un rotor rigide.

➤ Rotors flexible

Un rotor est généralement considéré comme étant flexible quand il fonctionne à proximité ou au-dessus de sa fréquence naturelle. Si l'arbre commence à se déformer sensiblement au début de la plage des vitesses de fonctionnement, il est appelé un rotor flexible. [3].



Fig.3.Rotor [4].

I.4. Différents types de palier

I.4.1. Palier à roulement

Pour une question de fiabilité et de sécurité, le guidage du rotor est généralement assuré par des roulements à billes ou à rouleaux lesquels ne fournissent qu'un amortissement très faible. Il en résulte des pics de vibration d'amplitude dangereusement importante lorsque des vitesses critiques sont traversées. La vitesse maximale d'un palier à roulement croit lorsque le diamètre du rotor et la charge diminuent. A titre d'exemple, la vitesse maximale d'un palier à roulement ordinaire supporté par un arbre de diamètre de 100 mm ayant une charge maximale de 400 kN peut atteindre 30 krpm [5].



Fig. I. 4. Palier à roulement [6]

I.4.2. Palier lisse

Un palier lisse est constitué d'un arbre qui tourne à l'intérieur d'un coussinet séparé de celui-ci par un film de fluide. La figure. I. 4 montre des coussinets rainurés.

Sous l'application d'une charge, les centres du coussinet et de l'arbre ne coïncident plus et il existe un coin convergent-divergent dans le film. La rotation de l'arbre entraîne du fluide dans le coin convergent et crée un champ de pression qui s'oppose à la charge et qui l'équilibre.



Fig. I.5. Palier lisse [7]

I.4.3. Paliers aérodynamiques

Principe de fonctionnement de palier aérodynamique est la même que celle du palier hydrodynamique, la seule différence étant beaucoup plus faible viscosité dynamique du gaz par rapport au liquide. Ils sont donc utilisés dans des machines de grande précision et de petite taille où se trouvent réunis de grandes vitesses de rotation avec de très faibles jeux (appareils de mesure, industrie médicale). [8].

Paliers aérodynamiques à feuilles

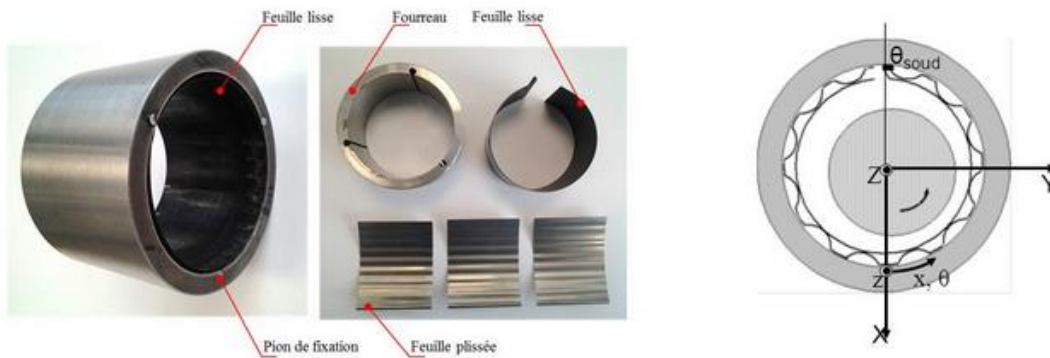


Fig. I. 6. Palier aérodynamique [9]

I.4.4 Paliers magnétiques

Les paliers magnétiques permettent de supprimer tout contact entre un arbre et un bâti, d'éliminer les lubrifiants et tous les problèmes de frottement. Ces paliers ont une très grande précision de guidage. Ils peuvent fonctionner dans le vide et sont utilisables dans une large gamme de températures (-200°C à 450°C) avec une dissipation d'énergie mécanique pratiquement nulle [10].

I.4.4.1. Principaux paliers magnétiques

a) Le palier magnétique passif

Les paliers magnétiques passifs sont les plus simples à réaliser. Ils sont autonomes. Leur fonctionnement ne nécessite aucun apport d'énergie venant de l'extérieur, comme les paliers magnétiques actifs, ni un refroidissement comme les paliers supraconducteurs. Néanmoins ils ne peuvent être utilisés seuls pour des raisons de stabilité. Les paliers magnétiques passifs doivent donc être associés à un système mécanique (roulement, palier hydrodynamique, butée à aiguille...) ou à autre type de palier magnétique. Les paliers magnétiques passifs sont de deux types : les paliers à aimants permanents et les paliers à réluctance variable. [10]

b) Le palier magnétique actif

Les paliers actifs sont des électroaimants dont le courant est asservi pour maintenir la partie mobile du circuit magnétique dans une position fixée. Ils ont besoin d'un apport d'énergie pour fonctionner. Pour alimenter chacun des actionneurs constituant un palier actif, il faut une alimentation de puissance, une commande et un capteur de position. L'exemple le plus simple est celui de la butée active [10]



Figure 1.7 : Paliers magnétiques [11].

I.4.4.2. Avantages de Paliers magnétiques

- Roulements magnétiques sont sans contact et peuvent être utilisés dans techniques du vide, des chambres propres et stériles, le transport des fluides agressifs ou purs médias
- Vitesses les plus élevées sont possibles, même jusqu'à la résistance à la rupture de rotor.

I.4.5. Paliers aérostatiques

Absence de joints de lubrification permet le plus grand et plus rigide arbre de rotor.

Les paliers aérostatiques sont des paliers circulaires prévus avec des alvéoles alimentées par des orifices. Tout comme les paliers aérodynamiques circulaires, ils sont utilisés pour réaliser le guidage en rotation d'un arbre mais ils ont l'avantage d'avoir une capacité portante importante, une raideur dynamique et un amortissement à vitesse de rotation nulle grâce à l'alimentation sous pression. Les problèmes rencontrés dans la conception du palier sont liés à l'instabilité pneumatique.

I.4.5.1. Les avantages des paliers aérostatiques

- 1.-Très faible frottement et par conséquent basse production de chaleur.
2. système plus « propre », puisqu'il n'est pas nécessaire de prévoir le retour du fluide a une bêche.

I.4.5.2. Les inconvénients des paliers aérostatiques

Jeu de fonctionnement très faible pour que le débit et la rigidité soient optimisés ce qui conduit è avoir un état de surface très précis du palier et du guidage, et une bonne filtration du fluide.

Capacité de charge moyenne due aux faibles pressions source utilisées par rapport è un système hydrostatique équivalent.

I.4.6. Palier hydrostatique

Les paliers hydrostatiques sont utilisés en conception de façon régulière dans le cas de machine ayant à supporter de lourdes charges axiales ou radiales où les vitesses de rotation sont très importantes (ex : turbines, turbopompes) ou ayant une grande raideur (ex : machine outils de grande précision tels que les aléseuses ou les rectifieuses). [11].

I.4.6. 1. Avantages et inconvénient des systèmes hydrostatique

L'inconvénient principal est le coût et l'encombrement. Cependant, dans de très nombreux cas, il est possible d'utiliser une source de pression existante pour faire fonctionner le palier ce qui réduit sensiblement le coût.

Les paliers hydrostatiques, particulièrement ceux qui fonctionnent avec des liquides, Possèdent de nombreux avantages :

- les deux surfaces sont toujours séparées par un film fluide, même lorsqu'elles sont Immobiles, ce qui théoriquement rend l'usure nulle et assure ainsi une très grande durée de vie. Le phénomène de frottement saccadé (stick-slip) au démarrage et à faible vitesse est Supprimé.

- La pression est distribuée sur une grande surface, il n'y a pas de concentration de pression et pas de fatigue des surfaces.

Comme la portance ne résulte pas du mouvement des surfaces, l'effet des imprécisions d'usinage est très atténué surtout dans le cas des liquides. [11]



Figure 1.8. Palier hydrostatique [12].

I.4.7. Palier hydrostatique à trois patins

Dans notre étude nous considérons un palier hydrostatique constitué de trois alvéoles.

La figure. 11 représente les éléments qui forment un palier hydrostatique à 3 patins, contrôlés et alimentés par trois résistances hydrauliques.

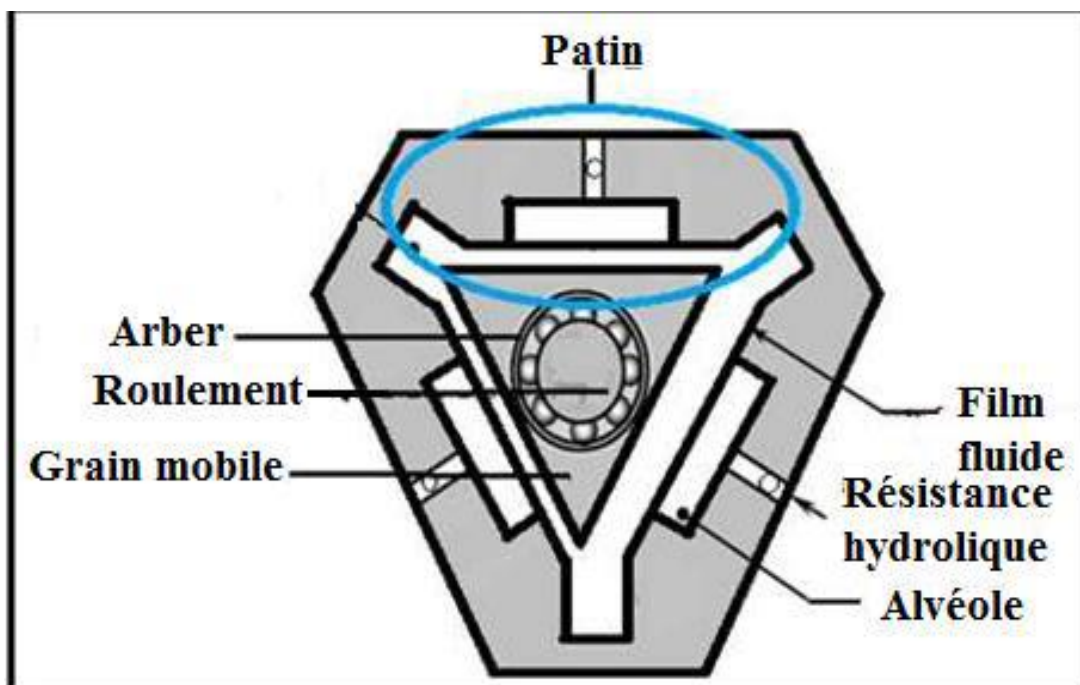


Fig. 9. Palier hydrostatique à trois patins.

I.5. La lubrification hydrostatatique

La lubrification hydrostatatique est parmi les procédés les plus utilisés dans le domaine Industriel, et est défini comme un système de lubrification dans lequel le film de support de charge de fluide, en séparant les deux surfaces, est créé par une source extérieure, comme une pompe, fournir un fluide sous pression suffisante.

Les paliers hydrostatatique peuvent donc fonctionner à vitesse relative nulle et charge très élevée en présence d'un film d'une épaisseur adéquate (d'où le nom «Hydrostatatique»).

I.5.1. Principes de la lubrification hydrostatatique

Dans tout dispositif hydrostatatique, une des deux surfaces en regard est lisse tandis que l'autre comporte une ou plusieurs cavités (alvéoles) reliées à un générateur de pression figure1.10. [13]

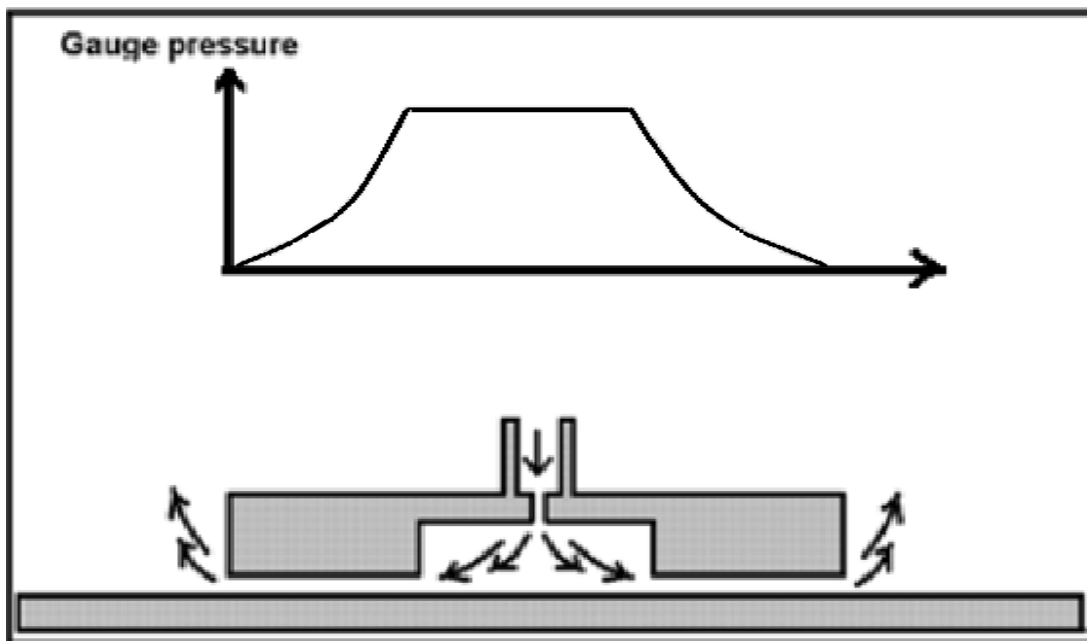


Fig. I. 10 :Principe de la lubrification hydrostatatique

I.5.2. Méthodes principales d'alimentation de liquide dans le palier

Les deux principales méthodes utilisées pour introduire le liquide à l'intérieur de la butée sont l'alimentation à débit constant et celle à pression constante.

On distingue deux régions :

- Une zone représentée par les portées AB et CD de largeur « a » où l'épaisseur « h » du film lubrifiant est mince ; l'évolution de la pression dans cette région est décrite par l'équation de Reynolds. On suppose que la pression ne varie pas selon l'épaisseur du film. Une zone BC constituée par la cavité où l'épaisseur du film lubrifiante est grande : $e/h > 20$, dans cette région, la pression est supposée être constante :

$p = P_a$; cette hypothèse est très souvent Vérifiée expérimentalement[13].