

CHAPTRE I

Etude bibliographique

L'objet de ce chapitre est de faire présenter une étude bibliographique concernant des généralités sur l'état de l'art de la technologie des paliers est développées pour mettre en évidence l'importance du sujet traité

I.1 Dynamique du rotor

I.1.1 Différents types d'excitations

Les rotors sont soumis à diverses sollicitations extérieures, outre le poids propre, on trouve les efforts de balourd, qui sont propres aux machines tournantes. Ceux-ci correspondent aux forces d'inertie générées par le mouvement rotatif des masses excentrées et non équilibrées du rotor. L'origine des efforts de balourd est variée. Il peut être soit des problèmes d'usinage, de montage, etc.

Les éléments de base d'un rotor sont: Les paliers, le disque, l'arbre et le balourd (FigureI.1)

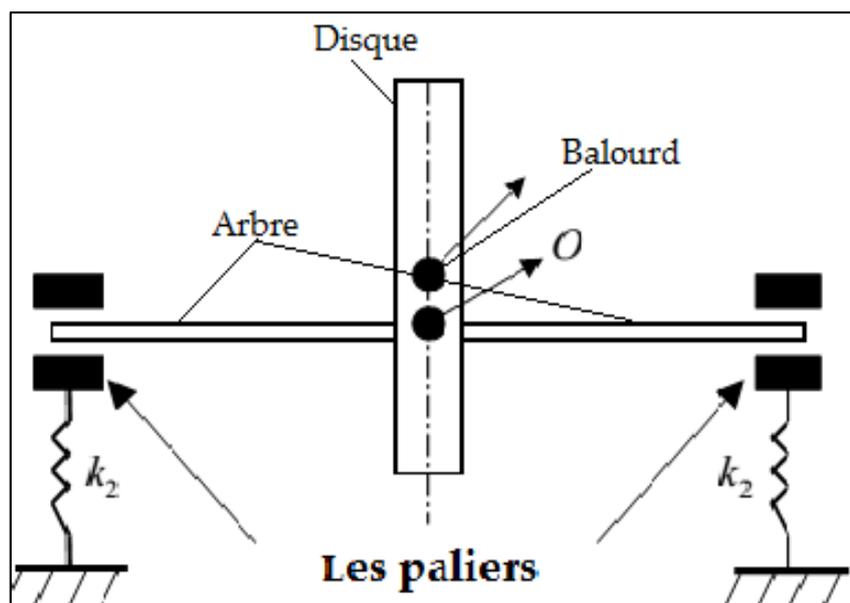


Figure I.1 : Eléments de base d'un rotor

I.1.2 Oscillation libre non amortie

- **Oscillation libre**

Si un système, est abandonné a lui-même autour d'une situation d'équilibre stable, il évolue en suite de part et d'autre de cet état, on parle alors d'oscillation libre.

L'état instantané d'un système est caractérisé par l'évaluation d'une grandeur physique mesurable (déplacement, angle) qui prend compte de l'écart de système par rapport à la position d'équilibre.

- **Oscillation non amortie**

Si, pendant la durée des mesures, les phénomènes dissipation de l'énergie sous forme de chaleur (frottement) provoquent une diminution de l'amplitude d'oscillation, inférieure à la sensibilité des appareils de mesure, on peut qualifier les oscillations de non amorties.

- **Oscillation linéaire**

L'équation différentielle qui régit l'évolution de la grandeur caractéristique (déplacement, angle) est linéaire.

I.1.2 Les passages des régimes dans un arbre

I.1.2.1 Régime permanent

Un régime permanent ou régime forcé entretenu par l'entrée et présentant des caractéristiques n'évoluant presque plus.

C'est entre deux régimes transitoires (démarrage et arrêt de la machine).

I.2.2 Régime transitoire

Un système est dit en régime transitoire, pendant la durée de passage d'une situation stable à une autre situation stable. C'est le cas lors des démarrages, des changements de vitesse, des freinages ou des arrêts des moteurs.

Un système est dit en régime permanent lorsqu'il entre dans une phase d'équilibre. Son évolution dans le temps reste stable. C'est le cas d'un moteur qui atteint son fonctionnement nominal.

I.2 Les différents types palier

I.2.1 Historique

La tribologie (par définition science du frottement de l'usure et de la lubrification) a ses racines dans des temps très anciens. Par exemple, les Egyptiens ont très vite été confrontés au transport de lourdes pierres pour construire les pyramides et ils ne connaissaient pas la roue ni le roulement ! Les Assyriens utilisaient astucieusement des rouleaux pour déplacer de lourdes charges. La problématique est devenue alors: rouler ou glisser ?

Plus tard les Romains ont abondamment utilisé la roue avec axe et moyeu. La problématique est alors vite devenue: rouler sans user ! Il faudra attendre le XIII^{ème} siècle pour voir apparaître le roulement à bille d'abord en Inde puis dans les croquis de Léonard de Vinci vers 1500; puis les premières machines pour mesurer le frottement (tribomètres). La lubrification est apparue comme une véritable technologie à part entière. Les premières lois du frottement sec et lubrifié ont suivi. Des noms célèbres en tribologie (Amontons, puis Coulomb, un ingénieur de la Marine). Vers le XVIII^{ème} siècle, la tribologie était une science purement expérimentale. Puis les Anglais ont apporté des théories ainsi que le rôle de la chimie des lubrifiants dans le frottement et la réduction des différents types d'usure. Il fallait alors frotter sans user [1]

I.2.2 Paliers hydrodynamiques

Un palier hydrodynamique est constitué d'un arbre qui tourne à l'intérieur d'un coussinet fixe séparé de celui-ci par un fluide lubrifiant. Le mouvement d'arbre présente un certain excentrement par rapport au coussinet, il forme ainsi un convergent et un divergent dans le fluide. La rotation de l'arbre entraîne le fluide dans le coin convergent et crée un champ de pression hydrodynamique qui s'oppose à la charge et l'équilibre. La vitesse maximale d'un palier hydrodynamique supportant un arbre de diamètre de 100 mm ayant une charge maximale de 400 kN peut atteindre $60 \cdot 10^3$ tr/min. Cependant, l'emploi de paliers hydrodynamiques résulte des seuils de vitesses supercritiques au-delà desquelles ils rendent le système instable ; ce qui découle des termes de couplage de la rigidité du film d'huile. Cette instabilité, dénommée "Oil whip", apparaît à une vitesse égale au double de la première vitesse critique du rotor et est caractérisée par un régime sous-synchrone qui dégrade dangereusement la performance de l'ensemble mécanique [3].

- **Avantages**

Assez économique à mettre en œuvre (besoin d'une pompe, pour faire circuler le lubrifiant à travers plusieurs paliers, mais à faible pression) frottement assez faible.

- **Inconvénients**

Les surfaces sont mal lubrifiées au démarrage, surtout après une longue période d'arrêt.

I.2.3. Les paliers lisses

Les paliers lisses sont fréquemment utilisés; les plus simples sont constitués d'un arbre cylindrique tournant à l'intérieur un alésage en présence de lubrifiant. Sur certains mécanismes, ils correspondent à la meilleure solution technologique existant actuellement. On les rencontre dans les moteurs thermiques, les compresseurs, les turbomachines, les alternateurs, les réducteurs, etc... La figure 1 présente différents coussinets de paliers circulaires.



Figure I.2: Palier lisse

Un palier lisse est constitué de deux éléments, l'arbre généralement en acier de rayon R_a et le coussinet en bronze ou en acier régulé de rayon intérieur R_c et de longueur L . Ainsi, un palier lisse peut être schématisé par deux cercles de rayons voisins et caractérisé par trois grandeurs : le jeu radial $C = R_c - R_a$, le rapport C/R (ou jeu relatif de l'ordre de 10^{-3}) et le rapport L/D de la longueur au diamètre du palier. La figure.1.3 présente les trois phases que l'on observe lors de la mise en route d'un palier sous charge. Les points O_a et O_c représentent respectivement les centres de l'arbre et du coussinet et W désigne la charge extérieure appliquée à l'arbre.

A l'arrêt, (figure.I.3.a), l'arbre et le coussinet sont en contact, la génératrice commune est opposée à la charge et la distance $O_c O_a$ est égale au jeu radial C .

Au démarrage, (fig.I.3.b), l'arbre roule en glissant à l'intérieur du coussinet, le régime de lubrification est dit mixte, le lubrifiant est entraîné dans l'espace convergent formé par l'arbre et le coussinet. Dès que la vitesse de rotation devient suffisante, il y a création d'un champ de pression hydrodynamique qui s'oppose à la charge (fig.I.3.c). Pour une vitesse de rotation stable, et une charge W constante, le centre de l'arbre O_a occupe une position fixe à l'intérieur du coussinet.

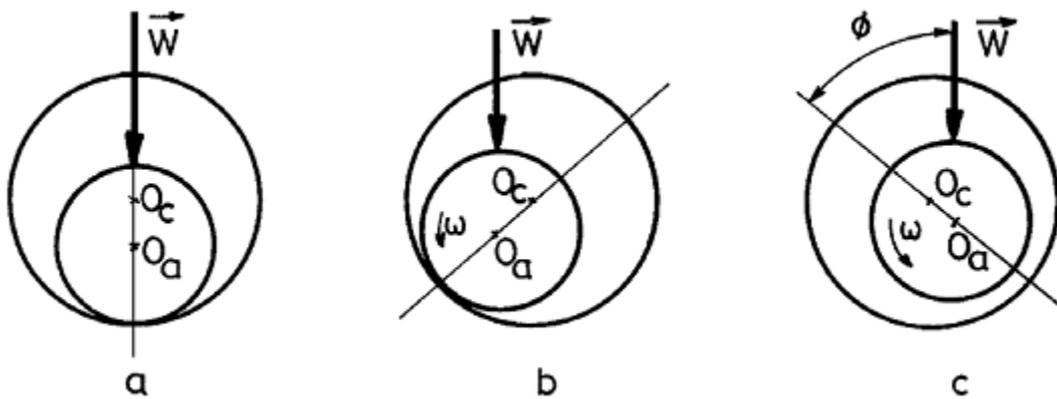


Fig. I.3.: Schématisation d'un palier lisse

I.2.4 Les paliers magnétiques

Les paliers magnétiques sont utilisés lorsque les autres paliers ont atteint leur limite. Ils permettent à un rotor de tourner sans frottement ni contact. Leur domaine de prédilection concerne les applications à très haute vitesse de rotation, celles pour lesquelles il faut minimiser les pertes, éviter l'usure, ne pas polluer un environnement sensible par des poussières ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance.



Figure I.4: Palier magnétique

I.2.5. Paliers aérodynamiques

Les butées et les paliers aérodynamiques fonctionnent sur les mêmes principes que ceux lubrifiés avec de l'huile. Leur particularité vient de la très faible viscosité des gaz lubrifiants, à la fois avantage et inconvénient, à laquelle s'ajoutent les spécificités apportées par la compressibilité. 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).



Figure I.5: Palier aérodynamique

I.2.6. Les paliers hydrostatiques

En général un palier hydrostatique comporte des alvéoles réparties sur un coussinet (figure I.8). Les surfaces du coussinet et de l'arbre sont séparées par un film lubrifiant qui

s'écoule des alvéoles vers les bords libres du palier. L'alimentation des alvéoles en fluide sous pression peut se faire de différentes façons, à pression constante ou à débit constant. La méthode la plus simple, et la plus courante, est celle à pression constante. Une pompe apporte du fluide à chaque alvéole, au travers d'une résistance hydraulique fixe ou variable. Les résistances hydrauliques fixes sont les plus fréquemment utilisées (tubes capillaires ou orifices en paroi mince), elles se trouvent immédiatement en amont de l'alvéole. Le deuxième type de résistance hydraulique est variable (capillaires élastiques, de type servo-valve "Diaphragm-controlled restrictors", etc.), elles sont plus performantes au point de vue de la raideur du palier car elles sont variables avec le débit [3, 4].

Les paliers hydrostatiques sont des systèmes de paliers, à cause de leurs précisions extrêmement élevées et presque sans usure, qu'on trouve dans les applications précises de la construction mécanique et les outils de mesure et de contrôle.

La figure 1.2 représente un schéma général d'un palier hydrostatique.

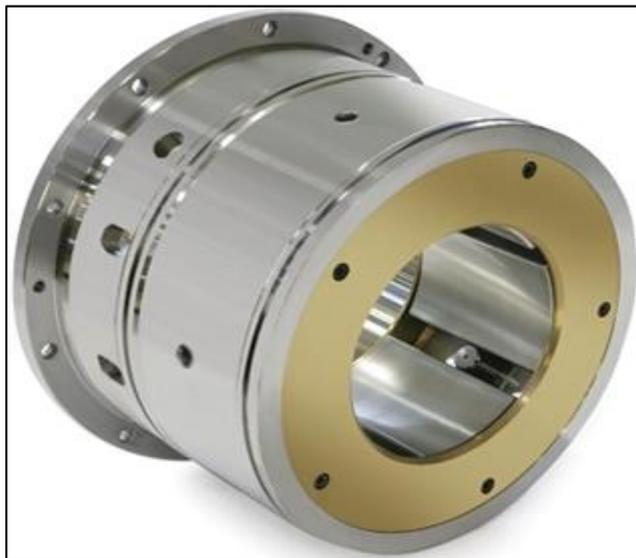


Figure I.6 : Palier hydrostatique

I.3. L'effet hydrostatique

Quand la vitesse corrélative dans deux surfaces est trop faible pour générer une pression sustentatrice, on introduit alors une pression dans le fluide par un système extérieur au palier pour obtenir un film d'huile épais, c'est l'effet hydrostatique.

La friction générée par le déplacement entre les deux surfaces ne sera alors fonction que du cisaillement de l'huile. Plus la pression extérieure sera forte et plus la friction sera faible du fait de l'accroissement de l'épaisseur de film.

Lorsque la vitesse relative des deux surfaces antagonistes a généré une pression hydrodynamique, mais qu'il existe toujours une source de pression extérieure, on parle de lubrification hybride (superposition d'un effet hydrostatique et d'un effet hydrodynamique).

En pratique, le terme hybride est très peu utilisé, et on désigne indifféremment par palier hydrostatique un mécanisme dont les surfaces sont immobiles ou en mouvement.

Historiquement[5], le premier palier hydrostatique a été défini par L. D. Girard en 1862; ce dernier utilisait ce type de palier dans une étude de train glissant sur des paliers hydrostatique plats.

I.3.1. Lubrification hydrostatique

I.3.1.1 Principe d'une butée hydrostatique

Un palier hydrodynamique présente l'inconvénient de ne fonctionner en état de frottement fluide que lorsque la vitesse est suffisamment élevée. Afin de créer le film fluide déjà à l'arrêt, on injecte le lubrifiant sous pression à l'aide d'une pompe dans des poches (figure I.7) où il crée une pression qui soulève la charge; il s'échappe ensuite par les lèvres des poches. L'espace de fuite se règle automatiquement en fonction de la pression et de la charge appliquées. Il est nécessaire de prévoir des restrictions dans les tuyaux d'amenée du fluide aux poches afin de stabiliser la position de la pièce mobile[7].

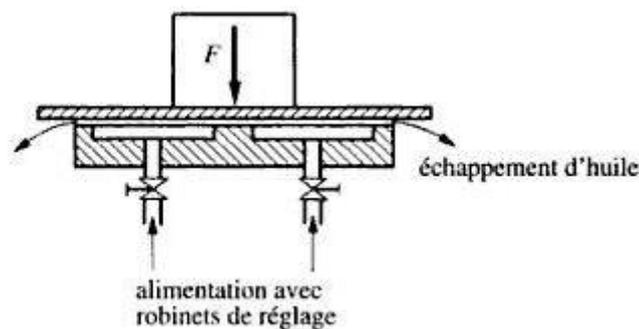


Figure I.7 : Schéma de principe d'un palier hydrostatique [7]

Dans le cas d'un palier non chargé, l'arbre est centré et la distribution de pression radiale est symétrique (figure I.8a).

Pour un palier chargé, l'arbre se déplace radialement dans la direction de la charge (figure I.8b) et la pression augmente sous la charge et diminue au-dessus.

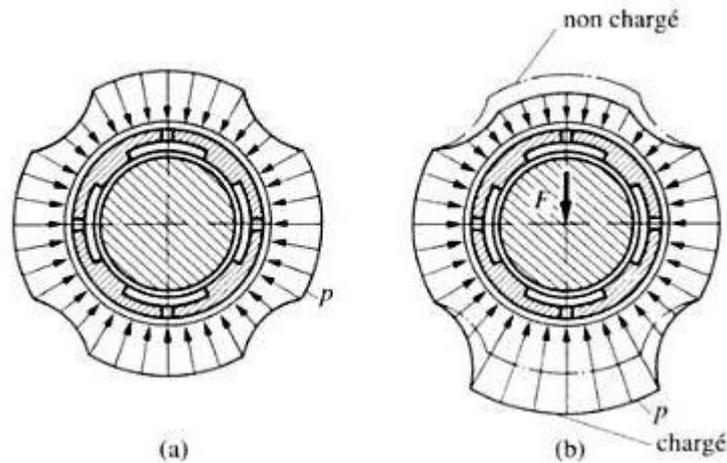


Figure I.8 : Distribution de pression dans un palier hydrostatique; (a) non chargé; (b) chargé [7]

I.3.1.2 Principe de la lubrification hydrostatique

Dans un dispositif hydrostatique, une des deux surfaces en regard est lisse tandis que l'autre comporte une ou plusieurs cavités (ou alvéoles) reliées à un générateur de pression (figure I.5).

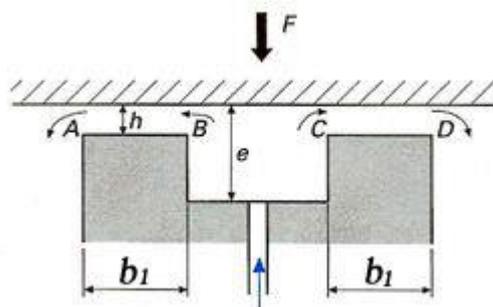


Figure I.9 : Schématisation d'une butée hydrostatique [8]

On a deux régions:

- Une zone représentée par les portées (AB) et (CD) de largeur (a) où l'épaisseur (h) du film lubrifiant est mince : $h/a < 1$.
- Une zone (BC) constituée par la cavité où l'épaisseur du film lubrifiant (e) est grande : $e/h > 20$; dans cette région, la pression est supposée être constante : $p = p_a$; cette hypothèse est très souvent vérifiée expérimentalement [8].

Il-y-a deux méthodes principales utilisées pour introduit le liquide à l'intérieur de la butée :

- Alimentation à débit constant: on place une pompe à débit constant entre le réservoir et l'alvéole. Ce système est peu employé car, lorsque le mécanisme comporte plusieurs alvéoles (ce qui est pratiquement toujours le cas), il faut soit alimenter chacun d'entre eux par une pompe individuelle, soit utiliser des régulateurs à débit constant. Cette solution, qui assure une grande raideur, est complexe et coûteuse.

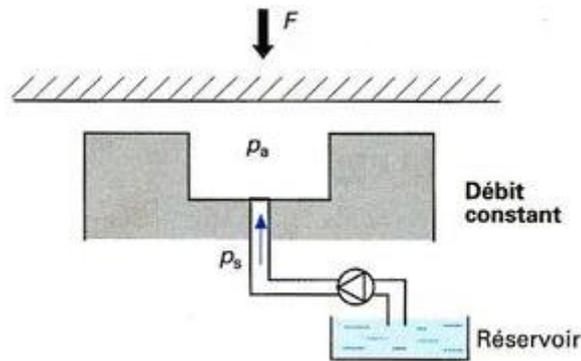


Figure I.10 : L'alimentation à débit constant [8]

- Alimentation à pression constante: on place une résistance hydraulique immédiatement en amont de l'alvéole. Le rôle de cette résistance est de créer une perte de charge, c'est-à-dire d'asservir le débit à la chute de pression. Ce système, simple à mettre en œuvre, permet d'alimenter plusieurs alvéoles avec une seule pompe à condition, bien évidemment, que le débit de celle-ci soit suffisant.

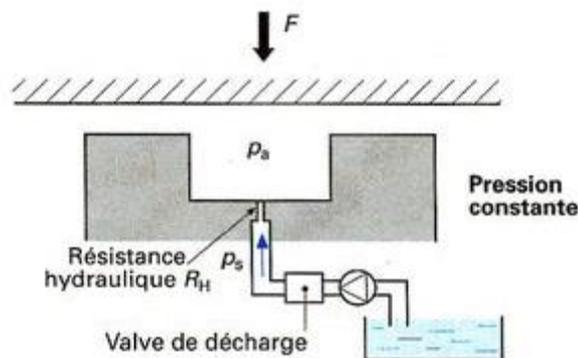


Figure I.11 : L'alimentation à pression constante [8]

Dans la pratique, le système hydraulique est plus complexe. La figure I.12 donne le schéma du circuit pour l'alimentation à pression constante d'un palier à quatre alvéoles.

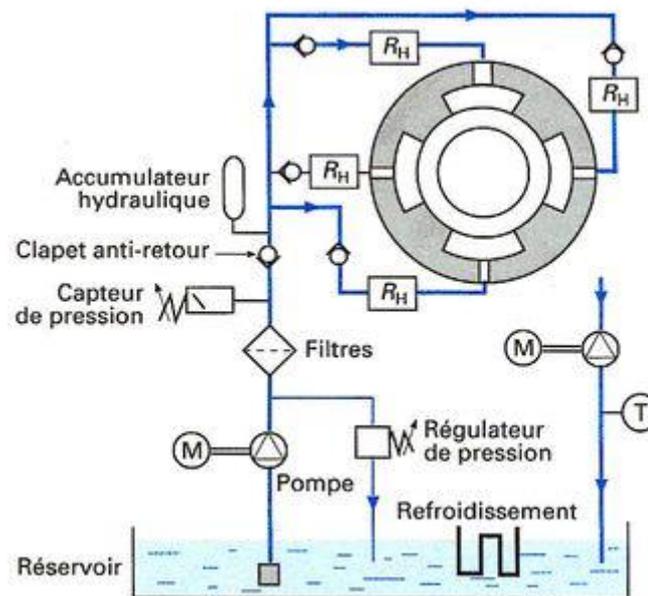


Figure I.12 : Principe de fonctionnement d'un palier hydrostatique à quatre patins; alimentation à pression constante: cas réel [8]

- Une pompe alimente le palier à un débit supérieur d'environ 30 % à celui nécessaire [8]; le surplus de liquide retourne au réservoir par l'intermédiaire d'un régulateur de pression.
- Un capteur de pression permet d'arrêter l'entraînement du rotor si la pression atteint une valeur trop faible.
- Le clapet anti-retour et l'accumulateur hydraulique assurent l'alimentation du palier jusqu'à l'arrêt complet de l'arbre (on peut aussi prévoir une pompe de secours).
- L'écoulement est ensuite dérivé vers chaque alvéole ; sur chaque portion de circuit, on peut prévoir un clapet anti-retour en cas de surpression dans un alvéole.
- La résistance hydraulique R_H doit être placée au plus près de l'alvéole afin d'éviter les instabilités de type pneumatique dues à la compressibilité du lubrifiant.
- Une pompe peut être nécessaire pour assurer le retour du lubrifiant vers le réservoir.
- Une prise de température T permet de contrôler la température du liquide à la sortie du palier et déclencher l'arrêt si la température devient trop importante.
- Enfin, un système de refroidissement assure une température constante au niveau de l'alimentation.

I.3.2. Avantages et inconvénients des paliers hydrostatiques

I.3.2.1. Avantages

Par rapport aux autres types de support, la différence essentielle est qu'il n'y a jamais de contact entre les deux surfaces puisqu'une pompe extérieure permet l'introduction de liquide sous pression à l'intérieur de la zone de contact et assure donc l'existence permanente d'un film lubrifiant même à vitesse nulle. Cela entraîne les avantages suivants:

- L'absence d'usure ;
- un coefficient de frottement très faible ;
- pas de frottement saccadé (stick-slip) ;
- une très grande raideur, permettant de conserver un positionnement précis malgré des fluctuations de charge importantes ;
- l'inexistence de concentrations de contraintes car, la pression étant sensiblement constante dans l'alvéole, la charge est supportée par une grande surface ;
- les défauts de forme des surfaces en présence ayant moins d'importance qu'en régime hydrodynamique, car la pression dans l'alvéole est fonction du débit global, c'est-à-dire de la distribution d'épaisseur de film et non pas de l'épaisseur en un point ;
- des problèmes thermiques au sein du film lubrifiant très souvent secondaires, car on est en présence d'un écoulement forcé à débit important ; ainsi, l'hypothèse d'un régime d'écoulement isotherme est justifiée.

Ces avantages montrent que le domaine d'utilisation des paliers hydrostatiques est très vaste.

Citons quelques applications particulières :

- Les télescopes et grandes antennes radars, qui doivent se déplacer très lentement et de façon régulière ;
- les cylindres pour broyeurs de minerai, dans lesquels les températures ambiantes sont très élevées ;
- les machines-outils de précision et les machines de contrôle, où une grande précision de centrage et une grande rigidité sont nécessaires ;
- les turbopompes, utilisées pour véhiculer des fluides cryogéniques à très basse température et animées de grandes vitesses de rotation ;
- les dispositifs de mesure sur machines d'essai, qui nécessitent d'isoler des éléments afin de mesurer précisément les efforts.

I.3.2.1 Inconvénients

- Les inconvénients majeurs des dispositifs hydrostatiques sont leur coût, car ils nécessitent une pompe, des filtres, des régulateurs de pression, etc., et leur fiabilité, car le moindre incident dans le système d'alimentation peut entraîner la destruction des surfaces.

I.4 Les huiles lubrifiantes

Les huiles lubrifiantes actuellement utilisées sont généralement constituées d'un fluide de base appelé « base de lubrifiant » qui peut être synthétique ou d'origine minérale, auquel sont ajoutés de nombreux additifs dont la nature varie avec la destination du produit.

I.4.1 Huiles de base

Selon l'origine du lubrifiant les bases minérales peuvent être classées en deux grandes catégories [11] :

Les bases à structures paraffiniques formées d'hydrocarbures saturés à chaîne droite. Ces bases présentent une grande stabilité à l'oxydation et possèdent un indice de viscosité élevé (de l'ordre de 100) ; elles sont par ailleurs peu agressives vis à vis des élastomères habituellement utilisés pour les joints d'étanchéité. Cependant le haut poids moléculaire de certaines chaînes peut entraîner la cristallisation de l'huile dès la température ambiante. Les isoparaffiniques qui possèdent un indice de viscosité moins élevée ne présentent pas cet inconvénient.

Les bases à structures naphthénique, formées de noyaux cycliques. Ces bases sont moins stables à l'oxydation, et présentent un indice de viscosité plus faible (de l'ordre de 50) ; elles sont par ailleurs relativement agressives vis à vis des élastomères. Elles possèdent par contre d'excellentes caractéristiques à basse température.

Ces différentes bases sont généralement obtenues par distillation et raffinage de pétrole brut ; cependant pour des applications plus particulières, les procédés d'hydrocraquage permettent d'obtenir des huiles de base à faible teneur en aromatiques (produits à structure benzénique), à haut indice de viscosité et de très bonne résistance à l'oxydation après additivation.

De nombreux produits synthétiques ont été développés ces 30 dernières années pour résoudre des problèmes de lubrification particulièrement difficiles. On peut citer comme

exemple les fluides de haute stabilité thermique, les fluides difficilement inflammables et les lubrifiants pour l'aviation.

Parmi les principales familles de produits utilisés on mentionnera :

- Les esters aliphatiques qui se caractérisent par un indice de viscosité élevé, une faible volatilité et des propriétés lubrifiantes excellentes.
- les esters phosphoriques utilisés souvent comme additifs anti-usure, qui présentent un indice de viscosité élevé et sont difficilement inflammables,
- les silicones et silicates qui ont un excellent indice de viscosité et un point d'écoulement très bas ; cependant leurs propriétés lubrifiantes ne sont pas très bonnes, - les polyphényléthers qui présentent une remarquable stabilité à haute température (jusqu'à 450° C environ) et qui sont d'excellents lubrifiants. Ils ont cependant un indice de viscosité faible et sont très onéreux,
- les polypropylènes glycols qui se caractérisent par un indice de viscosité élevé, un point d'écoulement très bas et de bonnes propriétés anti-usure, cependant ils ont une stabilité thermique et une résistance à l'oxydation assez moyenne et certains ne sont pas miscibles aux bases minérales,
- les polyoléfines qui présentent un indice de viscosité assez élevé et un point d'écoulement très bas.

Tous ces produits sont utilisés soit purs soit en mélange avec d'autres bases synthétiques ou minérales.

I.4.2 Additifs ou dopes

Les propriétés des bases utilisées sont généralement modifiées par des composés de structures chimiques très variées, appelés additifs ou dopes que nous allons examiner succinctement [11,12].

- additifs "améliorant d'indice de viscosité"
- additifs de point d'écoulement
- additifs détergents et dispersants
- additifs anti-usure et extrême pression
- additifs antioxydants

D'autres produits sont encore utilisés comme additifs ; on peut citer :

- Les additifs d'onctuosité qui agissent par absorption sur les surfaces du contact et qui sont destinés à diminuer les frottements dans le cas de contact métal sur métal. Ce sont des esters gras, alcools gras, amines grasses et acides gras.
- Les additifs antirouille qui agissent par absorption sur le métal et formation d'une couche protectrice quasi-imperméable à l'air, à l'eau et aux composés corrosifs. Ces produits qui sont des sulfonâtes, naphènes, des sels d'amines et des acides gras, sont parfois incompatibles avec les additives anti-usures.
- Les additifs anti-émulsionnants dont le rôle est d'éviter la formation de mousse

I.4.3 Viscosité des lubrifiants

De toutes les propriétés physiques et chimiques à considérer en lubrification, la viscosité est l'une des plus importantes. Dans les paliers, les engrenages et les systèmes hydrauliques où le régime de fonctionnement est hydrodynamique, c'est la viscosité qui détermine les pertes par frottement, la capacité de charge et l'épaisseur du film d'huile.

La viscosité est véritablement une mesure de l'aptitude physique d'un fluide à assurer la lubrification par film complet sous des conditions définies de vitesse, de charge et de température.

I.4.3.1 Définition de la viscosité

Selon ;[10] la norme N.F. T 60-100 de Novembre 1959 : « La viscosité d'un liquide est la propriété de ce liquide, résultant de la résistance qu'opposent ses molécules à une force tendant à les déplacer par glissement dans son sein ». Ainsi la viscosité d'un fluide est la résistance opposée par ce fluide à tout glissement interne de ses molécules les unes sur les autres. 1.7.4.

I.4.4 Fluide newtonien

Le modèle de fluide newtonien décrit bien la très grande majorité des fluides composés de molécules simples. La définition d'un fluide newtonien est assez restrictive: les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au gradient de vitesse, ce qui implique que :

- dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes créées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté.

I.4.5 Fluide non-newtonien

Toute déviation des règles du fluide newtonien est le signe d'un comportement non-newtonien.

La description de ces comportements et leur interprétation en relation avec la structure microscopique du fluide constitue une discipline appelée rhéologie. Cette discipline est assez récente, mais elle a connu un développement considérable avec l'apparition des polymères synthétiques.

Le caractère non-newtonien le plus répandu est la variation de viscosité avec la vitesse de cisaillement. Très souvent, pour les solutions de polymère, la viscosité diminue au fur et à mesure que l'on augmente le taux de cisaillement (gradient de vitesse) auquel est soumis le fluide. C'est le comportement rhéofluidifiant.