

I.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].

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. Cependant les premières applications à caractère industriel datent de la fin des années 1940 [2].

L'avantage des systèmes hydrostatiques qui permettent d'assurer des guidages très précis, sans à-coup, sans usure et avec un frottement quasi indépendant de la charge, a été mis en évidence de façon spectaculaire lors de la réalisation du télescope de Mont Palomar. Ce télescope mis en service en 1947, a une masse de 470 000 kg et repose sur 6 patins hydrostatiques de 0,5 m² de surface chacun. Le moteur utilisé pour entraîner en rotation l'ensemble du télescope a une puissance de 62 W. Le coefficient de frottement est inférieur à 10^{-6} . Il faut cependant ajouter à la puissance dissipée par frottement, la puissance de la pompe qui injecte le fluide sous pression dans les alvéoles des butées hydrostatiques. Cette puissance de 2,5 kW reste très raisonnable comparée à la masse du télescope mise en mouvement. Le télescope du pic du midi est lui aussi supporté par des butées hydrostatiques.

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.

I.2. Définition

Les paliers sont des organes de machines utilisés pour guider les arbres en rotation. Deux grandes familles de paliers existent : les paliers lisses et les paliers à roulements. Dans les premiers, l'arbre prend appui sur un coussinet et est séparé de celui-ci par un film lubrifiant ; dans les seconds, des corps roulants (billes ou rouleaux) séparent la bague en rotation de l'alésage extérieur. Selon la direction de la charge par rapport à l'arbre en rotation.

En générale, un palier est défini comme la partie fixe d'une machine qui supporte une partie mobile [3].

I.3. Différentes type de palier

I.3.1. 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. Lors d'un 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 60.10^3 tr/min. Cependant, l'emploi de paliers hydrodynamiques résulte en 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 [4].



Fig I.1 : Palier hydrodynamique [5].

I.3.1. 1 Avantages et inconvénients des paliers hydrodynamiques

- **Avantages**

- Assez économique à mettre en œuvre (pas de forcément besoin d'une pompe, sinon 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.

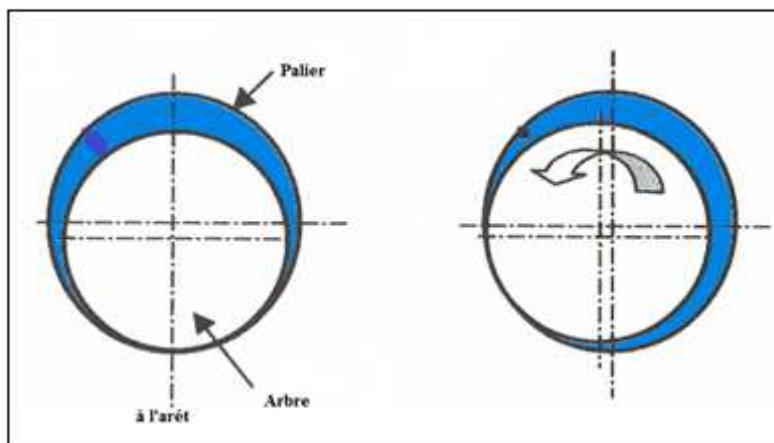


Fig I.2 : Phénomène hydrodynamique [6].

I.3.2. Paliers lisses

Les paliers lisses sont fréquemment utilisés, mais leurs principes de fonctionnement est plus complexe. Les paliers lisses sont constitués d'une ou de plusieurs parties. Les surfaces d'appui de l'arbre sont des coussinets en bronze ou en fonte douce, de rayon intérieur R_c et de longueur L . La partie de l'arbre portée par le palier est le tourillon, la partie externe c'est le manchon.

Si le tourillon et le manchon sont fabriqués en acier de rugosité R_a , même avec une bonne lubrification les surfaces de palier peuvent se frotter l'une contre l'autre et provoquent le grippage de la machine. Par conséquent, les tourillons de la plupart des paliers sont fabriqués en laiton, en bronze ou en métal antifricion.

Les tourillons sont généralement lubrifiés sous pression. Ils sont souvent striés pour une distribution uniforme du lubrifiant sur toute la surface. On rencontre les paliers lisses dans les moteurs thermiques, les compresseurs, les turbomachines, alternateurs et réducteur, etc [4].



Fig I.3 : Palier lisse [5].

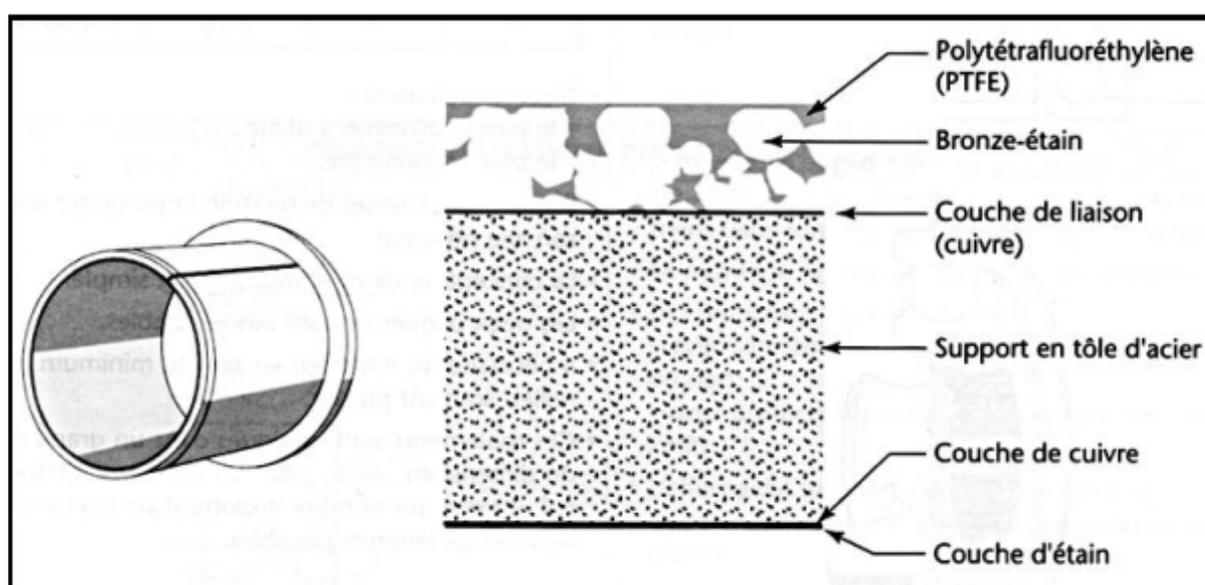


Fig I.4 : les composantes d'un Palier lisse [7].

I.3.3. Paliers à patin oscillants

Les paliers à patins oscillants sont exceptionnellement stables, leur réaction est complexe. Ils sont composés de (n) patins, qui peuvent être identiques ou non, individuellement articulés autour des pivots, est sont situés généralement sur un cercle appelé (cercle des pivots).

Les patins tournent autour de leurs pivots occupant une position d'équilibre statique telle que l'action hydrodynamique exercée sur chaque patin en régime dynamique, suivent le mouvement de l'arbre, ceci est à l'origine de la stabilité de ce palier [4].

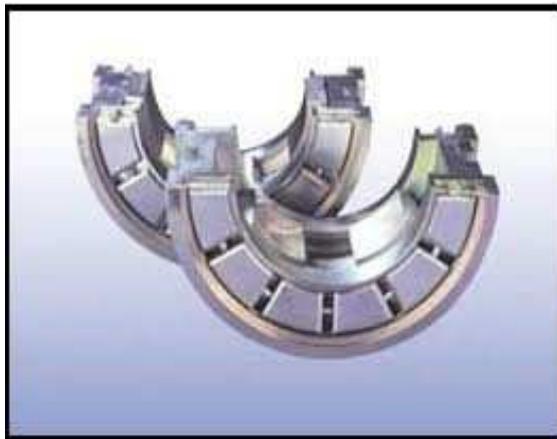


Fig I.5: Palier à patin oscillant [8] (directindustry.fr)

I.3.4. 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 [9].



Fig I.6. *Palier magnétique* [5]

I.3.5. 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).

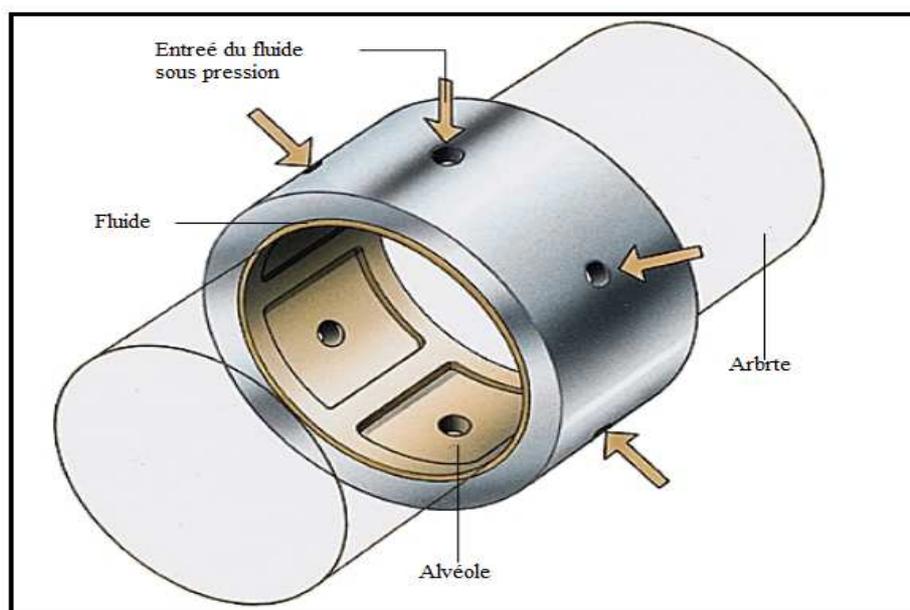
I.3.6. Palier hydrostatique

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 fonction est basée sur le fait par un approvisionnement de pression externe, le liquide lubrifiant sortant des canaux d'entrée est pressé de façon continue dans les chambres entre les surfaces des paliers. Ces surfaces de paliers sont toujours séparées par un film lubrifiant mince, pour éviter tout frottement de surfaces des paliers. Cela permet un réglage très précis du positionnement dans la limite du micromètre.

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 [4].



FigI.7 : Palier hydrostatique [10].

A. Domaine d'utilisation des butées et paliers hydrostatiques

Du fait de l'environnement important que nécessite un dispositif hydrostatique, du coût de sa réalisation et de l'absence de standardisation, on a recours à un système hydrostatique lorsqu'un roulement ou un palier hydrodynamique ne permet pas un fonctionnement correct. Les avantages énumérés précédemment montrent que le domaine

d'utilisation des butées et 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 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.

B. Palier hydrostatique à trois patins

Dans tout dispositif hydrostatique, l'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 [11].

On considère dans nos études un palier hydrostatique constitué de trois alvéoles. La figure (I.8) représente les éléments qui forment un palier hydrostatique à 3 patins, contrôlé et alimenté par trois résistances hydrauliques

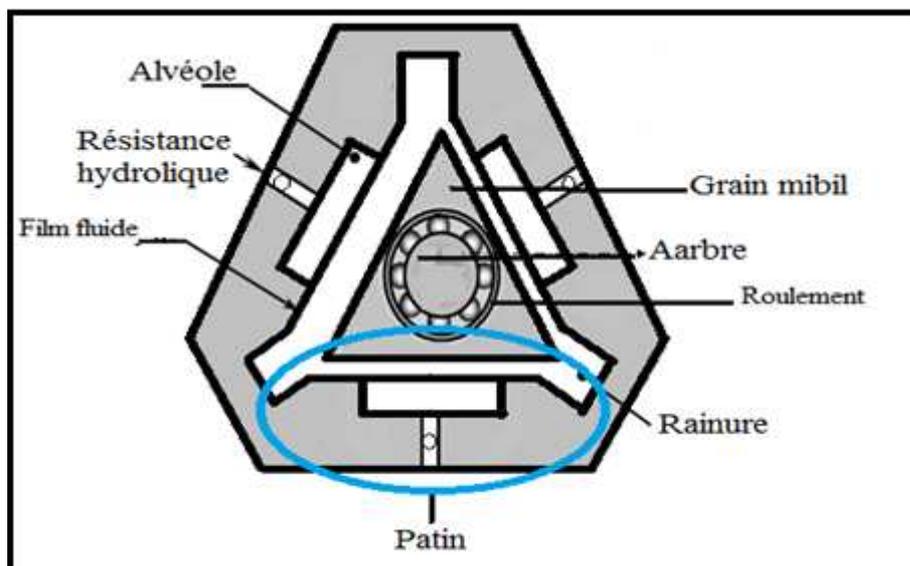


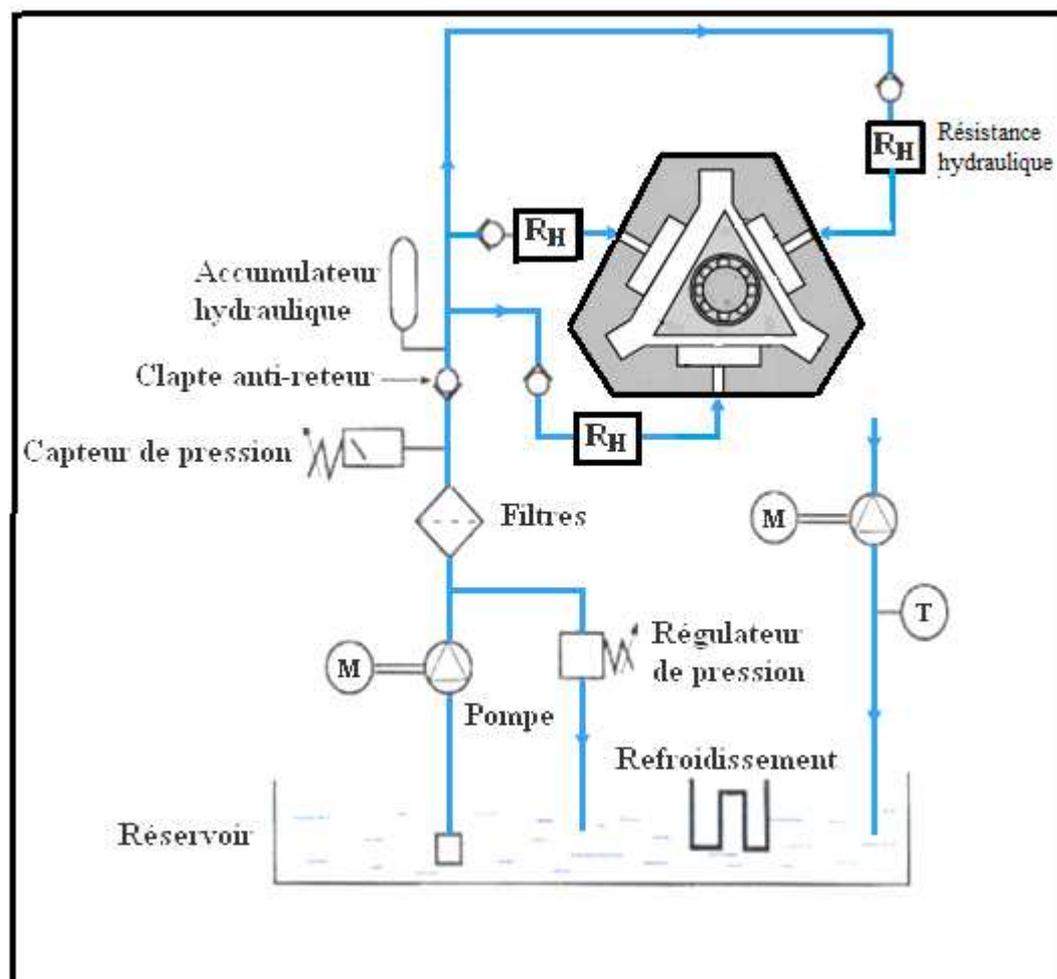
Fig I.8 : Palier hydrostatique à trois patins

I.4. Lubrification hydrostatique

Lorsque la vitesse relative entre 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.

La friction générée par le déplacement entre les deux surfaces ne sera alors fonction que du cisaillement d'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, parle de lubrification hybride.



FigI.9: Principe de la lubrification hydrostatique du palier

I.4.1. Principe Lubrification hydrostatique

Le système hydrostatique est de conception simple. Le principe de fonctionnement d'une boutée hydrostatique est présenté sur la figure (I.9).

Les systèmes plus élaborés peuvent posséder des alvéoles de compensation qui permettent, dans le cas de chargement non parfaitement centré, de ne pas avoir de couple de basculement donnant une épaisseur de film d'huile non constante.

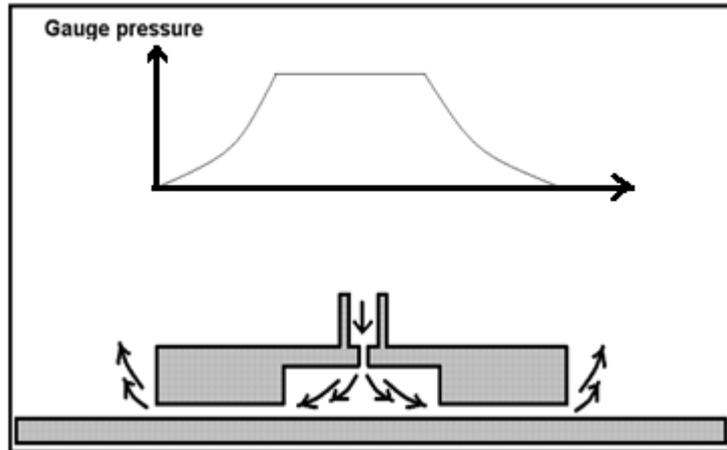


Fig I.10 : Principe de la lubrification hydrostatique

I.4.2. Méthodes principales d'alimentation de liquide dans le palier

Un système hydrostatique comporte deux surfaces, l'une est lisse tandis que l'autre comporte une ou plusieurs alvéoles.

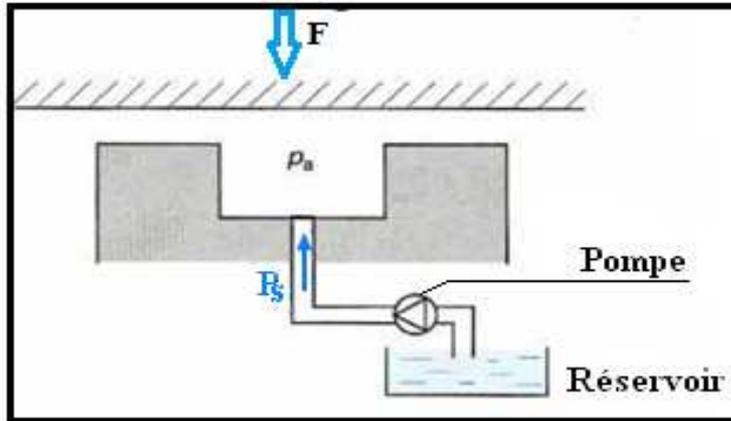
On distingue deux régions : des zones (les portées) où l'épaisseur h du film est mince et des zones, constituées par les cavités (ou alvéoles), dont la profondeur e est grande devant l'épaisseur du film h . L'arrivée extérieure du fluide se fait dans les alvéoles.

Les deux méthodes principales utilisées pour introduire le fluide à l'intérieur du palier sont :

- l'alimentation à débit constant : ce type de lubrification est seulement valable pour les liquides (figI.11).
- l'alimentation à pression constante à travers une résistance hydraulique (figI.12).

a. Système à débit constant

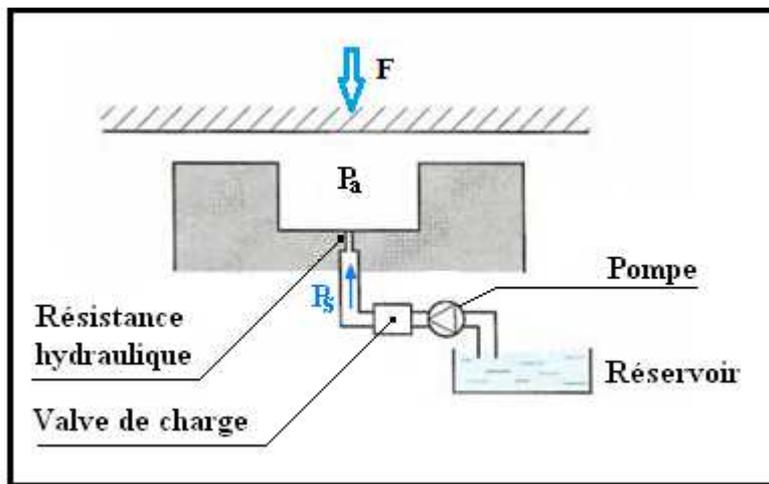
On place une pompe volumétrique entre le réservoir et l'alvéole (figure I.11). Lorsque le mécanisme comporte plusieurs alvéoles, on peut soit alimenter chaque butée par une pompe individuelle, soit utiliser des régulateurs à débit constant qui permettent de distribuer le fluide à partir d'une seule pompe. Cette solution qui assure une grande raideur est peu employée car elle est complexe et coûteuse.



FigI.11 : Alimentation à débit constant [11].

b. Système 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.

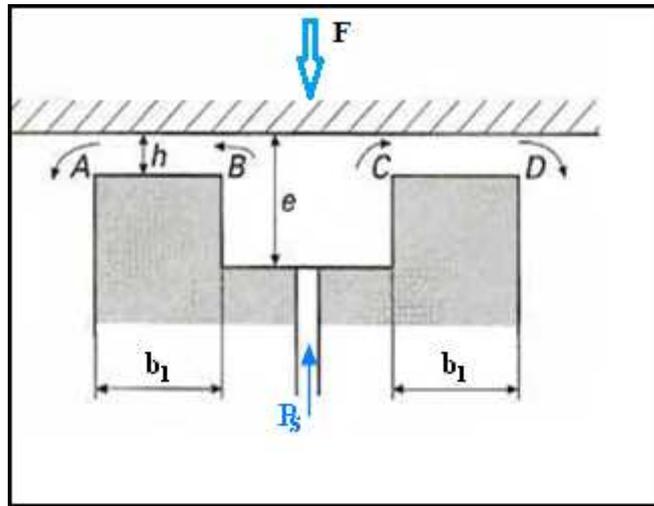


FigI.12 : Alimentation à pression constante [11].

I.5. Description d'une butée hydrostatique

On distingue deux régions dans une butée hydrostatique (Fig. I.13) :

- Une zone représentée par les portées AB et CD de largeur b_1 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 lubrifiant e est grande : $e/h > 20$; dans cette région, la pression est supposée être constante : $P = P_a$ (pression d'alvéole).



FigI.13 : Description d'une butée hydrostatique [11].

I.6. Avantages et inconvénients des paliers hydrostatiques :

I.6.1. Les avantages :

- 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 ;

- 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.

I.6.2. Les inconvénients

Les inconvénients majeurs des dispositifs hydrostatiques sont :

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