

## 1.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de faire un aperçu bibliographique concernant les paliers et les rotors et le contrôle actif des vibrations.

La première partie est consacrée à définir les rotors et les paliers, le principe de lubrification hydrostatique. La deuxième partie concerne une brève étude sur le contrôle active des vibrations.

### 1.1.1. Revue historique

La constante augmentation de la productivité et de l'efficacité des machines tournantes est le fruit de l'évolution des nouvelles technologies en conception et en fabrication. Ces améliorations engendrent des problèmes vibratoires et/ou d'instabilité qui sont susceptibles de se manifester lors du fonctionnement de ces machines. Un rotor est une structure souple qui peut être soumise à plusieurs types de perturbations : l'effet des balourds lors d'une montée et descente en vitesse, les sollicitations extérieures..., Le contrôle vibratoire nécessite un modèle adéquat de la structure. Les modélisations ont évolué au cours du temps. Le rotor a tout d'abord été supposé rigide. Puis ULBRICH [19] développe une méthode de modélisation de l'ensemble rotor/actionneurs appelée "système hybride multicorps". Puis des modélisations de type Eléments Finis (E.F.) ont été proposées. En 1989 BONNEAU [14] et KASSAI [16] modélisent un rotor avec plusieurs dizaines de degrés de liberté prenant en compte les efforts gyroscopiques. Ils utilisent la méthode de réduction dite "pseudo-modale" développée par LALANNE et FERRARIS en dynamique des rotors [17]. CHU et al. en 1993 [15] utilisent une méthode numérique rapide qui permet de prévoir les réponses asynchrones. Dans les modèles E.F., les actionneurs et les capteurs peuvent être facilement intégrés [18]. La maîtrise du comportement dynamique du rotor a tout d'abord concerné l'équilibrage, le contrôle passif par les paliers et l'optimisation des formes et des matériaux dès la conception.

## 1.2 Rotor

Un corps en rotation équipé de tourillons (ou portées) supporté par des paliers par définition un rotor. Un rotor est composé d'un arbre sur lequel sont montées les parties actives (roues, bobinages, engrenages, etc.). Il est maintenu dans le stator par des liaisons tournantes (des paliers radiaux et une butée axiale) ; les tourillons sont les parties de l'arbre en regard des paliers (Voir figure 1.1)

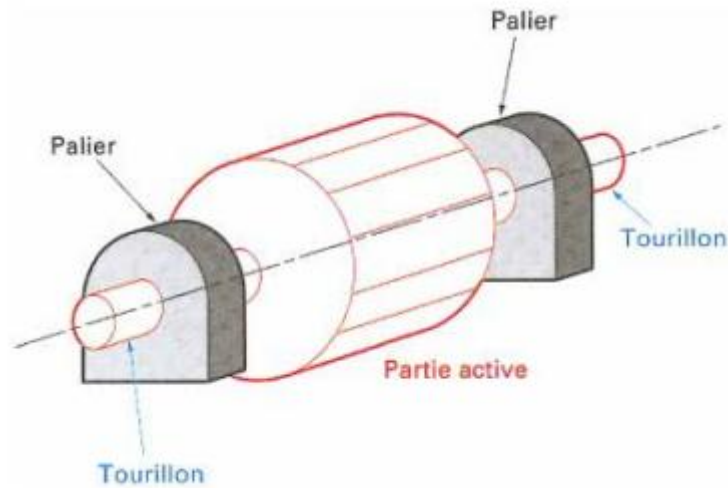


Figure 1.1 : Schéma de rotor entre palier [1]

Le rotor est soumis, entre autres, à un ensemble d'efforts stationnaires radiaux de fonctionnement, comme le poids, une réaction de denture pour un engrenage, des forces hydrodynamiques ou aérodynamiques pour des turbos machines, la résultante des paliers et de la butée, etc [1].

### 1.2.1. Eléments de rotor

Les éléments de base d'un rotor sont : (voir Figure 1. 2)

Le disque, l'arbre, les paliers et le balourd

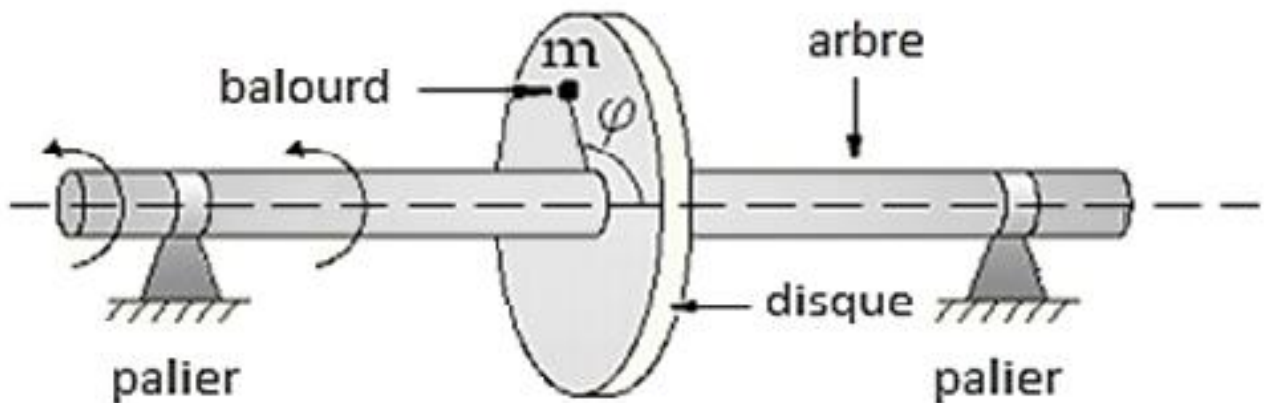
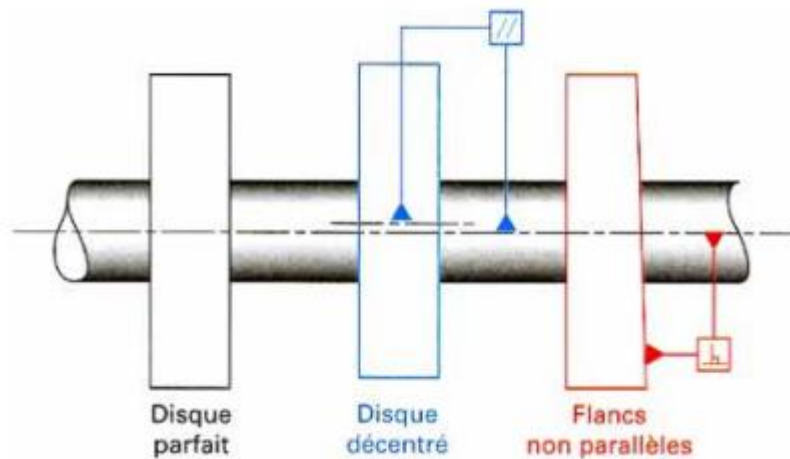


Figure 1.2 : Eléments de base d'un rotor

### 1.2.2. Rotors flexibles

Les sources de vibrations des machines sont multiples, parmi elle, la plus communes est certainement l'effort tournant engendré par un déséquilibre massique lorsque le centre de gravité de rotor n'est pas sur l'axe de rotation (voir figure 1.3).



**Figure 1.3 :** écarts d'usinage (excentricité, parallélisme) [1]

Les rotors étant en principe symétrique, leur centre de gravité devrait être confondu avec leur centre de rotation. Contrairement au rotor rigide, un rotor flexible se déforme. Le rotor à arbre élastique représente le rotor flexible le plus répandu dans la conception des machines tournantes. Ce faisant, il déplace le centre de gravité des différentes tranches du rotor et les efforts.

## 1.3. Différentes types des paliers

### 1.3.1. Palier à roulements

Entre l'arbre et l'alésage, il est interposé des roulements à billes ou à rouleaux généralement de fabrication standard. Ce mode de guidage en rotation est extrêmement répandu et très fiable s'il est correctement étudié, réalisé et exploité ; il autorise également de grandes vitesses de rotation et peut supporter de fortes charges. Son emploi en milieu aquatique est délicat et doit être réservé à des applications exceptionnelles nécessitant des rendements élevés et pour lesquelles la maintenance devra être aisée [2].

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 1 00 mm ayant une charge maximale de 400 kN peut atteindre 30 krpm [3].



**Figure1.4 : Roulements**

### Avantages

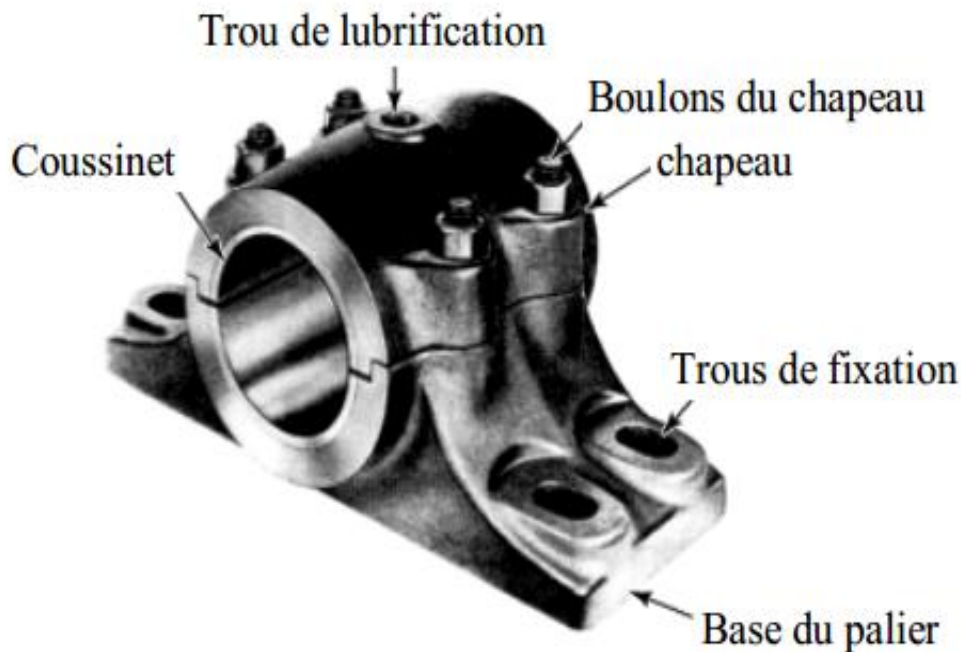
- Le roulement peut être facilement changé en cas d'usure.
- La valeur du jeu fonctionnel est garantie par le fabricant.
- Installation simple et facile à remplacer.
- Durée de vie plus grande.
- Possibilité de graissage à vie.
- Possibilité de supporter des charges combinées.
- Faible coût.

### Inconvénients

- Nécessitent encore un peu d'entretien périodique.
- Faible capacité d'amortissement.
- Problèmes de fatigue plus importants et de bruits.
- Fréquence de rotation limitée.

## 1.3.2. Paliers lisses

Ils sont caractérisés par un déplacement relatif des surfaces dans une phase appelé parfois mixte où le contact est métallique en présence de lubrifiant. Les paliers lisses sont utilisés pour supporter des arbres en rotation et chargés de forces radiales. Lorsque la bague couvre le tourillon sur 360°. Un film fluide sépare l'arbre de l'alésage palier, en alimentant le par un fluide sous pression(voir figure 1.5).



**Figure 1.5 : Palier lisse [4]**

### Avantages

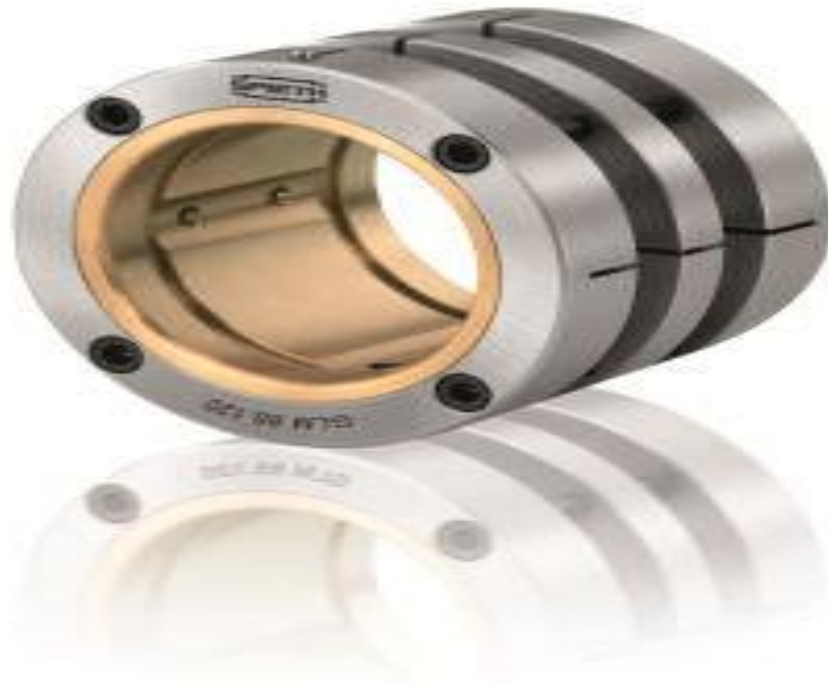
- Solution économique et simple à maitre en œuvre.

### Inconvénients

- Frottement plus élevés que les autres paliers.
- Lubrification pas toujours bien maitrisée dans le temps (penser à recharger en graisse...si c'est possible !).
- Performances limitées (vitesses et efforts).
- Ils nécessitent un grand couple au démarrage à des basses températures.

### 1.3.3. Paliers hydrodynamiques

Leur conception permet la formation d'un film de lubrifiant qui sépare complètement les surfaces solide de l'arbre et son alésage. Les paliers hydrodynamiques doivent atteindre une certaine vitesse de rotation pour que s'établisse un régime stable de lubrification qui est fonction du nombre de SOMMERFELD (voir ci-contre) [2].



**Figure 1.6 :** palier hydrodynamique

#### Avantages

- Assez économique à mettre en œuvre (pas forcément besoin d'une pompe, sinon pour faire circuler le lubrifiant à travers plusieurs paliers, mais à faible pression)
- Frottement assez faible une fois le régime hydrodynamique atteint.
- S'il y a circulation de lubrifiant. celui-ci sert en même temps à refroidir le palier.

#### Inconvénients

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

### 1.3.4. Paliers magnétiques

L'axe est constitué par un rotor ferromagnétique qui flotte dans le champ magnétique créé par des électro-aimants, la position du rotor par rapport au stator est asservie électroniquement. Ce type de palier autorise de grande vitesses de rotation convient pour les charges faibles à très fortes (plusieurs tonnes).son fonctionnement est particulièrement silencieux et sans usure.

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 [6].



**Figure 1.7 :** palier magnétique

### 1.3.5. Les paliers hydrostatiques

Les paliers hydrostatiques fonctionnent également sur le principe de la séparation des surface solide par un film de lubrifiant dont la pression et la circulation sont assurées dès le démarrage à l'aide d'une pompe. Peuvent être utilisés quel que soit la charge et la vitesse. Ils sont utilisés avec succès dans un grand nombre de machines fonctionnant à faibles vitesses et supportant de fortes charges [2]. Cependant, l'utilisation d'un palier hydrostatique dans des machines fonctionnant aux grandes vitesses en tant que support « ressort -amortisseur » par rapport aux autres types de paliers n'est pas répandue. Depuis l'avènement du contrôle des vibrations des rotors, le palier hydrostatique est nettement plus étudié en tant que structure contrôlable.

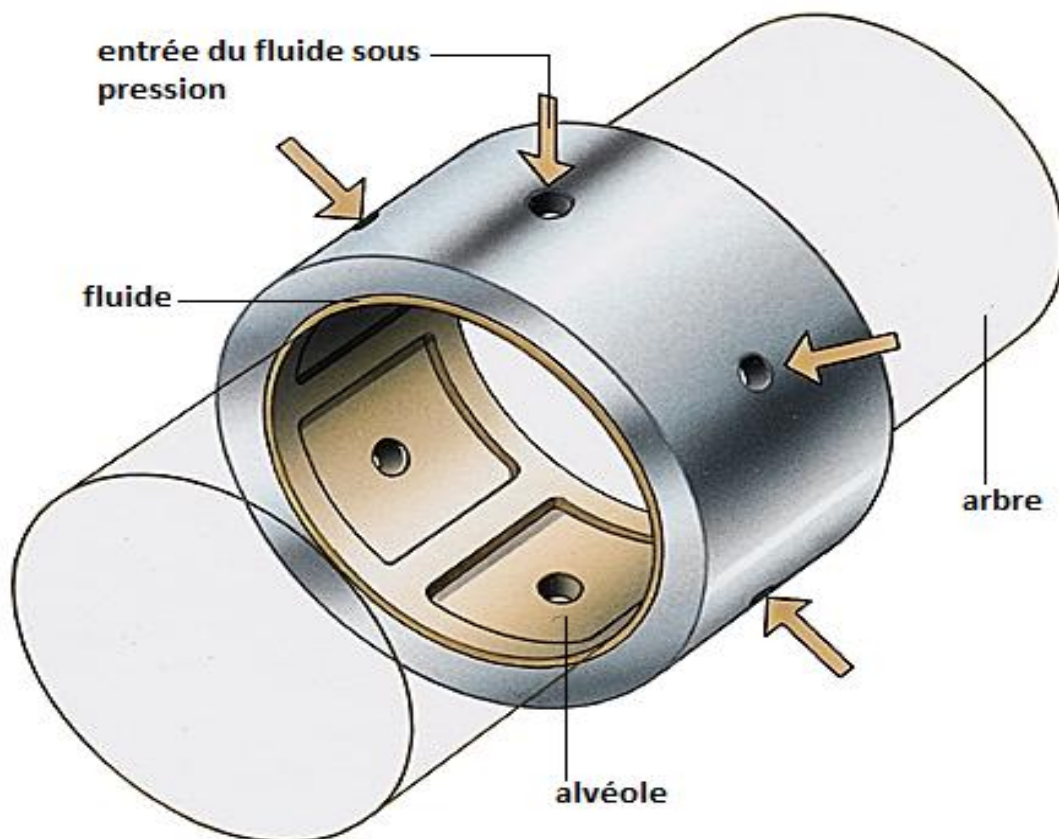
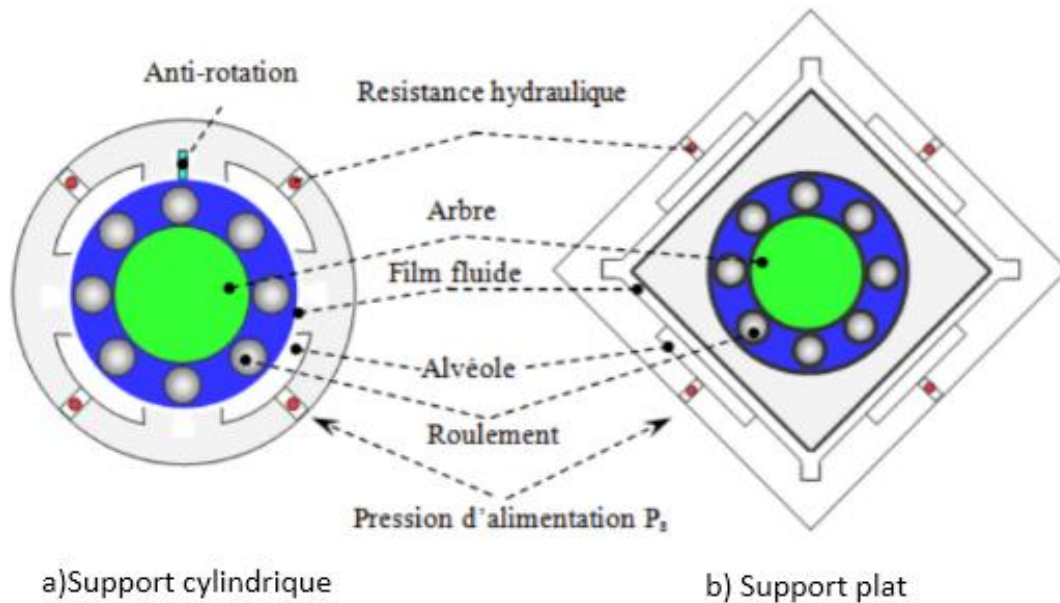


Figure 1.8 : palier hydrostatique





**Figure 1.9 :** Configurations de paliers hydrostatiques à 4 butées hydrostatiques

### Avantages

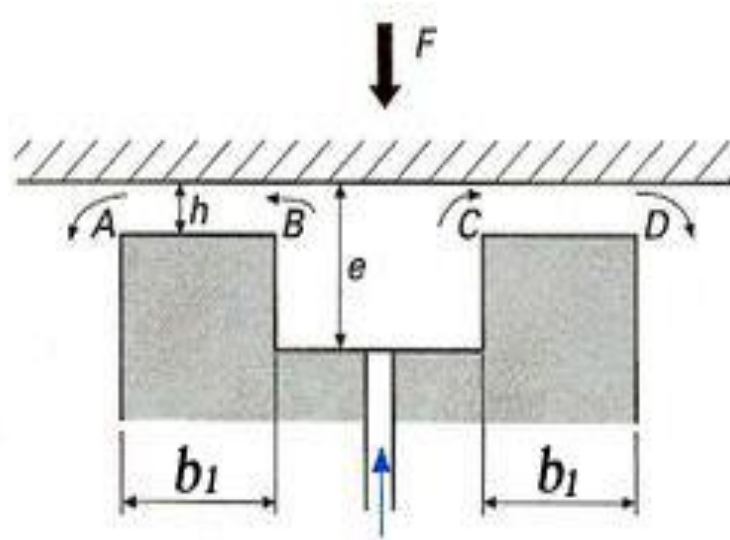
- Excellente efficacité, y compris au démarrage
- Frottements très faible
- La circulation de lubrifiant permet de maîtriser le refroidissement du palier
- une très grande raideur, permettant de conserver un positionnement précis malgré des fluctuations de charge importantes
- les défauts de forme des 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
- 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

### Inconvénients

- Mise en œuvre difficile et coûteuse.
- Nécessité d'une pompe externe, qui exige de la puissance (il faut à la fois un débit et une pression suffisants) et des filtres, des régulateurs de pression.

### 1.4. Principe de la lubrification hydrostatatique

Dans un dispositif hydrostatatique, 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 1.10).



**Figure 1.10** : Schématisation d'une butée hydrostatatique [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.

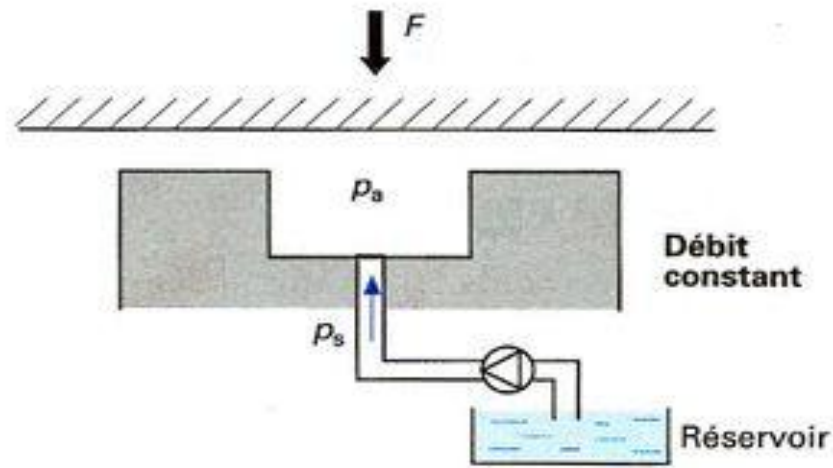


Figure 1.11 : L'alimentation à débit constant [8]

- 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.

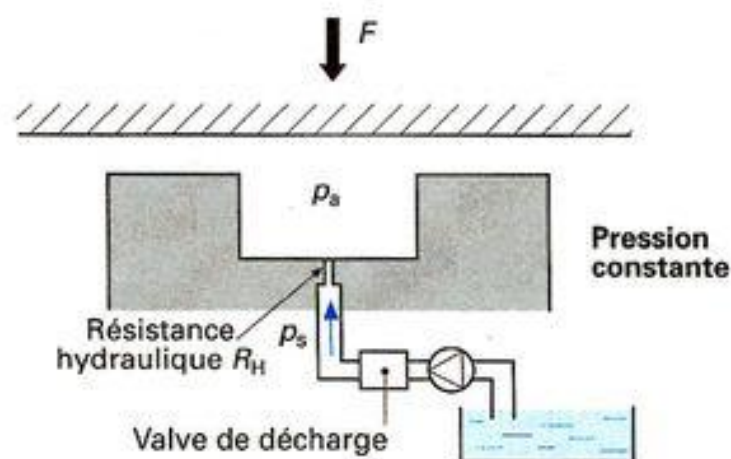


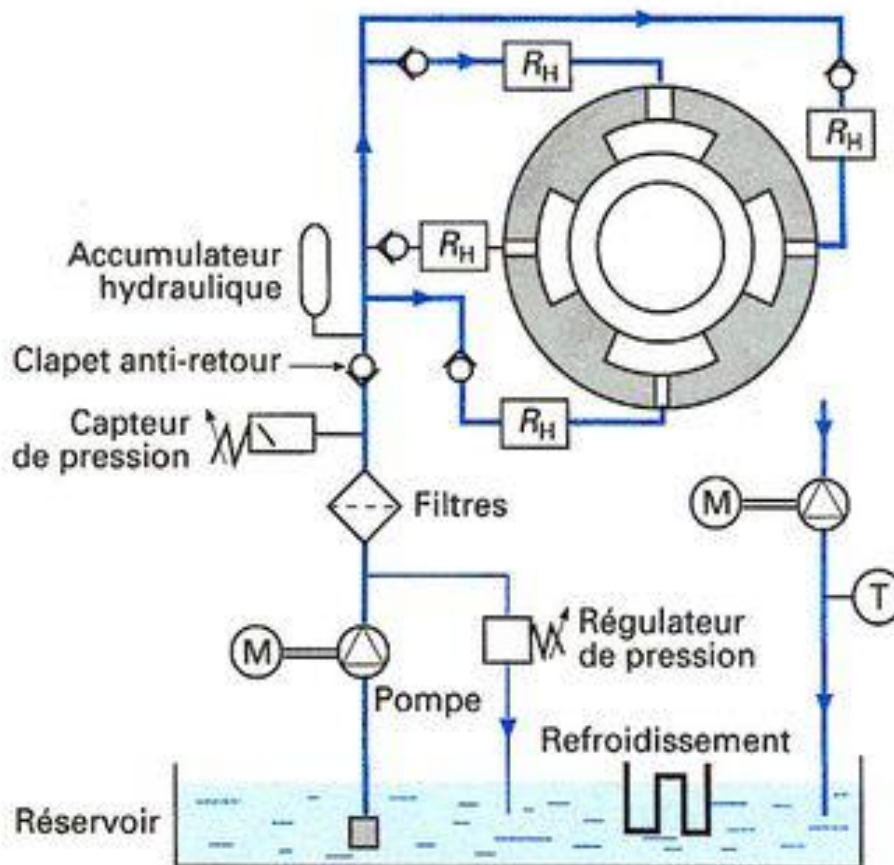
Figure 1.12 : L'alimentation à pression constante [8]

Dans la pratique, le système hydraulique est plus complexe, donne le schéma du circuit pour l'alimentation à pression constante d'un palier hydrostatique à quatre alvéoles. Une pompe alimente le palier à un débit supérieur d'environ 30 % à celui nécessaire. 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 du circuit. On peut prévoir un clapet anti-retour en cas de surpression dans une 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. Un thermocouple permet de contrôler la température du liquide à la sortie du palier et déclencher l'arrêt si celle-ci devient trop importante. Enfin, un système de refroidissement assure une température constante au niveau de l'alimentation [3].

Dans la pratique, le système hydraulique est plus complexe. La figure 1.13 donne le schéma du circuit pour l'alimentation à pression constante d'un palier à quatre alvéoles.



**Figure 1.13** : Schéma d'alimentation à pression constante cas réel principe de fonctionnement d'un palier hydrostatique à 4 butées hydrostatiques [8]

## 1.5. Contrôle des vibrations de rotors

### 1.5.1. Contrôle passif

Durant les dernières années, le contrôle des vibrations des rotors rigide ou flexible, a été utilisé dans un nombre croissant d'applications, surtout dans les pompes turbo moléculaires, les compresseurs, les broches tournantes des machines à moleter et les turbines à vapeur. Le réglage passif des paramètres du système n'aboutit généralement pas au comportement dynamique désiré à cause des effets des fortes charges dynamiques. C'est une des raisons pour lesquelles on doit s'intéresser au contrôle des vibrations des rotors [3].

### 1.5.2. Contrôle actif

Les paliers intelligents deviennent ainsi un moyen pour contrôler les vibrations des rotors et les forces transmises aux bâtis lors du passage aux vitesses critiques. L'emploi de l'amortissement par écrasement du film d'huile, appelé également film fluide- amortisseur, ("squeeze film dampers"), constitue l'une des solutions techniques les plus intéressantes pour contrôler les vibrations lors des passages des vitesses critiques. Une étude sur le contrôle des vibrations de rotors à l'aide des paliers hydrostatiques alimentés par un fluide électrorhéologique (Paliers intelligents) fait l'objet de cette étude [3].

### 1.5.3. Contrôle des pressions et amortissement

La tendance à des vitesses élevées de la rotation des machines tournantes et notamment plus élevées que les résonances fait que le comportement des rotors devient flexible. L'emploi de SFD (Squeeze film dampers) pour contrôler les vibrations des rotors a fait l'objet de nombreuses études. Burrows et autres (1983) ont étudié la possibilité de contrôler la pression dans un SFD pour diminuer la vibration des rotors. Adams et Zahloul, (1987) ont étudié le contrôle de vibrations des rotors à l'aide du contrôle de la pression d'alimentation dans un palier hydrostatique à quatre patins. Les coefficients dynamiques de paliers hydrostatiques ont été déterminés en utilisant la méthode de l'analogie électrique. Mu et al (1991) a suggéré un SFD actif avec un anneau conique mobile d'amortisseur. Cependant, dans un SFD, il en résulte que le premier mode est très dangereux par rapport au deuxième et troisième mode. Le réglage des paramètres du système par optimisation passive n'aboutit généralement pas au comportement dynamique désiré [3].