

## 1.1. Introduction

La dynamique des rotors est l'étude de la dynamique et la stabilité des machines tournantes, elle joue un rôle important dans l'amélioration de la sécurité et des performances de ces systèmes. Les machines tournantes trouvent des applications très diverses dans l'industrie : (machines-outils, centrales électriques, turbomachines, turbines d'avions, automobiles, propulsion marine...etc.)

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude bibliographique sur la dynamique des rotors, et des différents types palier.

## 1.2. Revue historique

La dynamique des arbres et rotors est une discipline qui a une remarquable histoire due à l'effet réciproque entre la théorie et la pratique [1, 2,3]. Elle concerne essentiellement l'étude du comportement vibratoire de machines tournantes telles que par exemple les pompes, les turbines et les compresseurs. Bien que la dynamique des arbres et rotors soit connue depuis l'invention de la roue, sa recherche proprement dite a commencé avec Rankine qui a publié un article en 1869 sur les mouvements de tournoiement d'un arbre tournant. Mais celui-ci a utilisé incorrectement la deuxième loi de Newton en choisissant un modèle malheureux et conclue que pour une certaine vitesse de rotation critique l'arbre tournant fléchit considérablement et qu'au-delà de cette vitesse son opération serait impossible [4].

En 1895, Dunkerley publia une étude sur les vibrations des arbres chargés par plusieurs poulies [5]. Cette même année Foepl utilisa un meilleur modèle et expliqua analytiquement que l'opération au-delà de la vitesse critique étant possible [6]. Ceci a été confirmé expérimentalement en 1899 par De Laval qui travaillait sur les turbines à vapeur. Il a réussi à opérer à sept fois la vitesse critique. Kerr publia en 1916 une autre évidence expérimentale qui montre qu'une deuxième vitesse critique pouvait être atteinte si l'on dépassait en toute sécurité la première [7]. Cette sorte de conflit qui existait a été enfin résolue par Jeffcott en 1919 qui confirme la prédiction de Foepl en écrivant le premier rapport sur la théorie fondamentale de la dynamique des rotors [8]. Les contributions de Jeffcott et De Laval sont encore très appréciées et c'est pour cela que leurs noms sont associés au modèle de base d'un rotor (un disque au milieu d'un arbre).

En 1924, Stodola écrivit un chef d'œuvre où il détailla les développements fait sur la dynamique des rotors [7]. Dans son travail il a introduit les effets gyroscopiques et montra que les solutions super critiques étaient stabilisées par les accélérations de Coriolis. En 1933, Smith était le premier à étudier les systèmes symétriques et asymétriques [8]. Les vibrations des rotors avec des masses continûment réparties ont été étudiées dans les années 50 et 60 par Bishop, Gladwell et Parkson qui ont reporté une série de publications sur les réponses déséquilibrées et l'équilibrage des rotors continus.

La méthode des éléments finis et la méthode de transfert de matrice sont les deux méthodes utilisées pour déterminer les fréquences naturelles, les modes et les réponses forcées au déséquilibre dans les systèmes à rotor complexes. La méthode de transfert des matrices qui est utilisée pour les systèmes multi rotors avec paliers a été développée durant les années 60 par plusieurs chercheurs. Par contre la méthode des éléments finis a été développée en premier dans le domaine de la dynamique des structures. C'est Ruhl et Booker qui, en 1972, étaient les premiers à faire l'application sur les rotors.

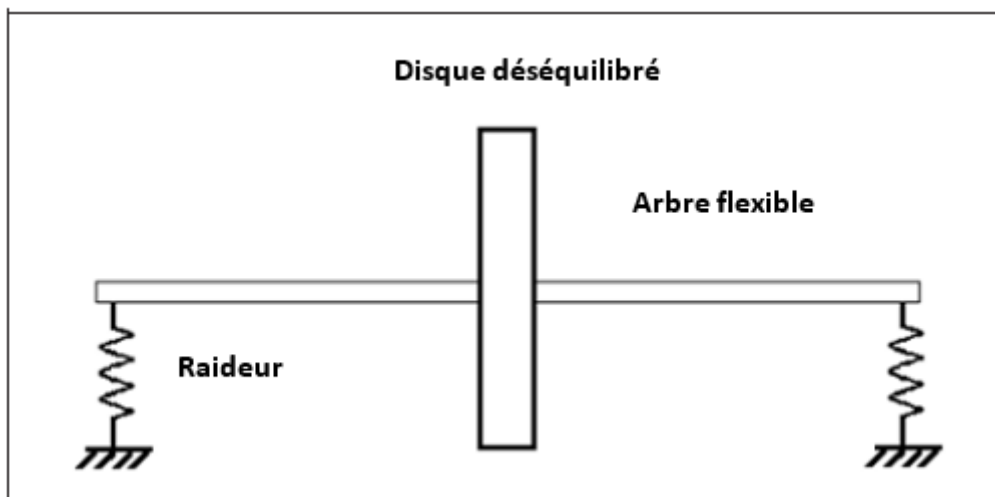


Figure 1.1 : Model de Jeffcott

### 1.3. Types de paliers

#### 1.3.1. 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 croît 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 [9].



a) Palier à roulement [21]

b) Déferant types des roulements [22]

**Figure 1.2 :** Palier à roulement

#### 1.3.2. 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].

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 la poussière ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance [11].

- **Le palier magnétique passif**

Ce palier est réalisé à partir d'aimants permanents ou d'électroaimants à courant d'excitation constante en utilisant soit les forces de répulsion, soit les forces d'alignement.

- **Le palier magnétique actif**

Ce palier travaille toujours en attraction avec des électroaimants à excitation variable commandée par des détecteurs de déplacement [10].

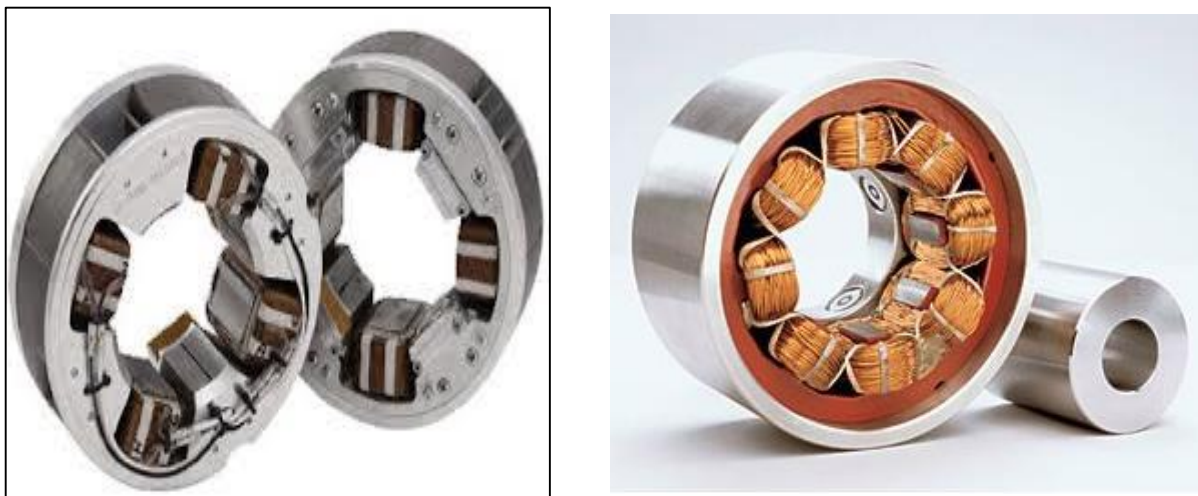


Figure 1.3 : Paliers magnétiques [23] [24]

### 1.3.3. Paliers hydrodynamiques

Sous condition d'une alimentation en huile ou liquide en quantité suffisante, la rotation de l'arbre et la convergence du film font naître une pression dans ce dernier. Celle-ci crée une portance qui tend à séparer l'arbre du palier. Si la séparation est totale et que donc tout contact

est évité entre les deux pièces en mouvement relatif, on passe en régime fluide. Ce dernier étant créé par la rotation de l'arbre, on le qualifie d'« hydrodynamique » [12].

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 krpm. Les paliers hydrodynamiques sont fréquemment utilisés dans l'industrie. On les rencontre dans les moteurs à combustion interne, les compresseurs et les turbines [9].

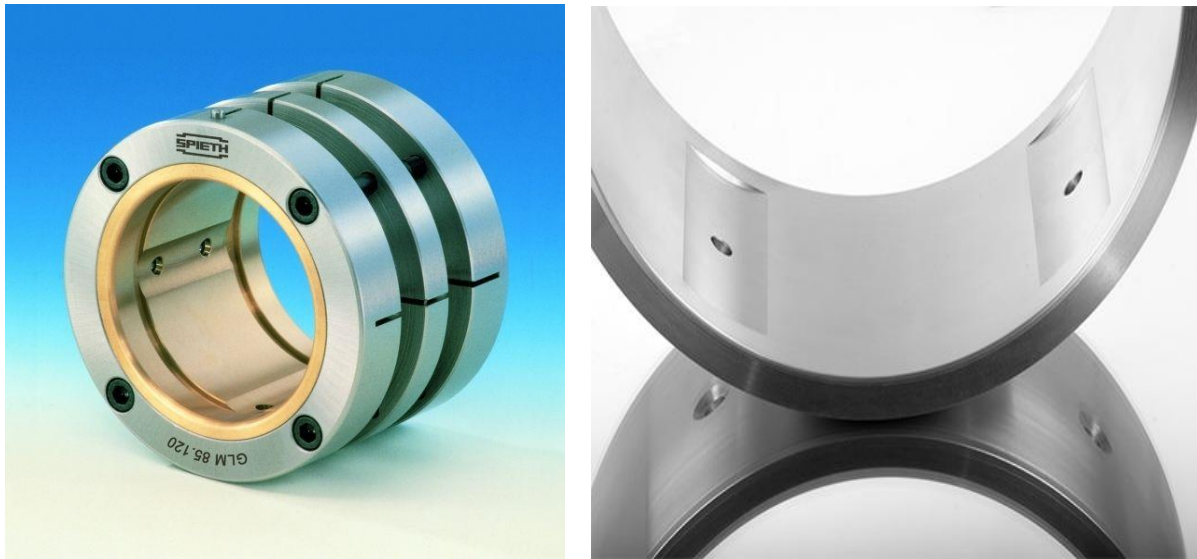


Figure 1.4 : Palier hydrodynamique [25] [26]

#### 1.3.4. Paliers aérodynamiques

Les paliers aérodynamiques fonctionnent sur le principe 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).

Tout comme le palier hydrodynamique, le palier aérodynamique peut engendrer des vibrations auto-entretenues différentes des vibrations forcées dues à des forces d'excitation extérieures (balourd par exemple). Les vibrations auto-entretenues existent, même en l'absence de forces extérieures excitant le système rotor-paliers. Elles proviennent d'un mécanisme interne au palier, transformant une partie de l'énergie de rotation en énergie de vibrations [13].

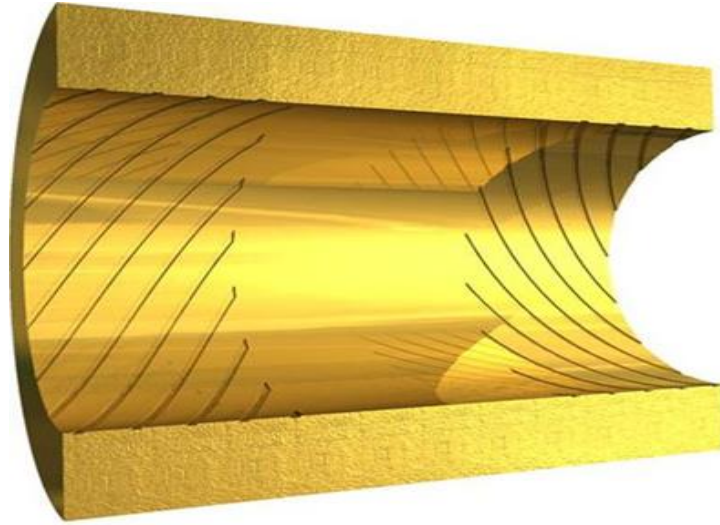


Figure 1.5 : Palier aérodynamique [27]

### 1.3.5. Paliers aérostatiques

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. Les solutions pour contrecarrer le problème d'instabilité aérostatique sont également :

- Utilisation des alvéoles d'alimentation peu profondes et avec un volume réduit. Pour les paliers aérostatiques, la condition de démarrage sous charge n'a plus de signification et il est courant d'éliminer complètement l'alvéole. Le palier est alors alimenté par des orifices inhérents débouchant directement dans le film mince.
- Augmentation du rapport  $P_r/P_s$  en utilisant des orifices de diamètre 4 à 5 fois supérieurs au jeu radial [14].

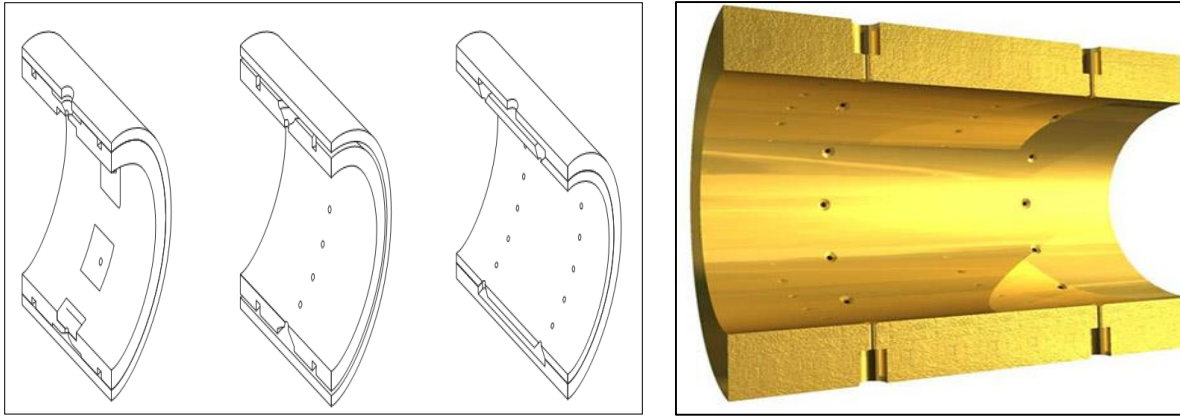


Figure 1.6 : Paliers aérostatiques [14] [27]

### 1.3.6. Paliers hydrostatiques

Les paliers hydrostatiques peuvent être utilisés quel que soit la charge et la vitesse [9]. Ils sont utilisés avec succès dans un grand nombre de machines fonctionnant à faibles vitesses et supportant de fortes charges. Cependant, l'utilisation d'un palier hydrostatique dans des machines fonctionnant aux hautes 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 [15]. Les systèmes hydrostatiques sont largement utilisés, mais sont réservés pour les conditions extrêmes. À la sortie de la pompe (pression  $P_s$ ) l'huile est filtrée, puis passe par une restriction dont le rôle est d'abaisser la pression du fluide jusqu'à une pression établie selon la charge  $W$ . Cet étranglement permet d'ajuster la pression dans les paliers à plusieurs cavités [16].

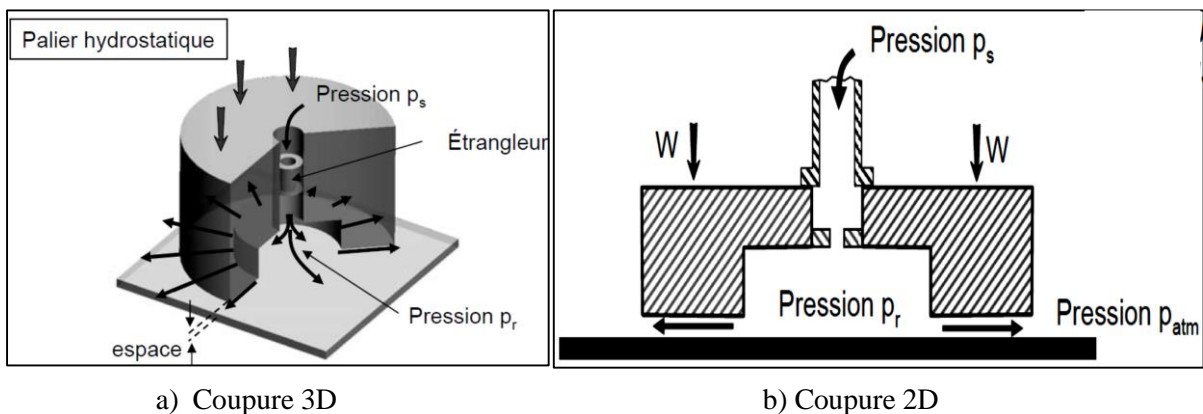


Figure 1.7 : Paliers hydrostatiques [16].