

## Chapitre 5. Transmission de mouvement

### Introduction

Il est nécessaire de guider tout corps animé d'un mouvement de rotation, l'arbre devra donc être porté par des paliers destinés d'une part à guider le mouvement de rotation et d'autre part à supporter les réactions générées par les diverses charges appliquées sur l'arbre. La lubrification et le graissage permettent de réduire les pertes de puissance par frottement.

### 1. Les paliers lisses

La figure 1 montre des paliers lisses de type coussinets. Les réactions axiales et radiales calculées au niveau des paliers servent à dimensionner ces paliers. Les paliers existent sous deux types : paliers lisses et paliers à roulements, ils sont montés au niveau des appuis pour guider l'arbre ou faciliter le mouvement de rotation et pour supporter les réactions axiales et radiales.

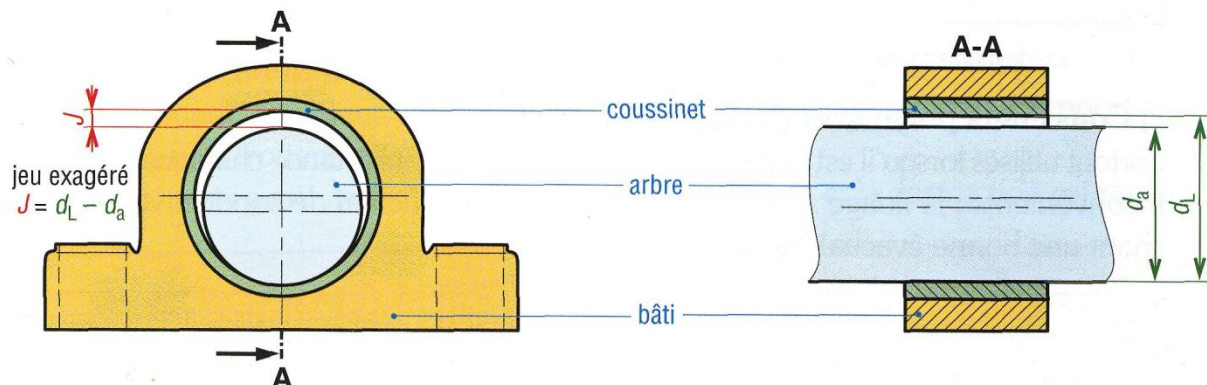


Figure 1 : Paliers lisses (coussinets)

### 2. Coussinets

Les paliers lisses supportent les grandes charges et ils sont utilisés lorsque les vitesses de rotation sont élevées, ils permettent un guidage plus précis de l'arbre car le nombre des pièces qui déterminent la précision de guidage est plus petite par rapport aux paliers à roulement, ils sont faciles à remplacer en cas d'usure (bonne maintenabilité), l'huile existant entre le coussinet et l'arbre diminue le transfert du choc de l'arbre vers le bâti. L'inconvénient des paliers lisses est qu'ils dissipent beaucoup d'énergie. En effet, le frottement qui existe au contact de la partie de l'arbre (tourillon) avec le coussinet est la cause d'une perte d'énergie qui se transforme en chaleur et augmente la température du palier lisse et l'huile de graissage.



Figure 2 : Coussinets en bronze roulé

### 3 Puissance perdue par frottement

La figure 3 un système de transmission composé d'un moteur, accouplement, palier lisse et une poulie. La puissance d'entrée du moteur est  $P_e$ , la puissance de sortie au niveau de la poulie est  $P_s$ , les puissances perdues au niveau de l'accouplement et au niveau de l'organe qui assure l'assemblage de la poulie avec l'arbre sont supposées négligeables, tandis que la puissance perdue  $P_p$  au niveau du palier lisse n'est pas nulle et ceci à cause du frottement entre le palier et l'arbre. Théoriquement, la puissance d'entrée  $P_e$  est égale à la puissance de sortie  $P_s$  et le rendement est égal à 1.

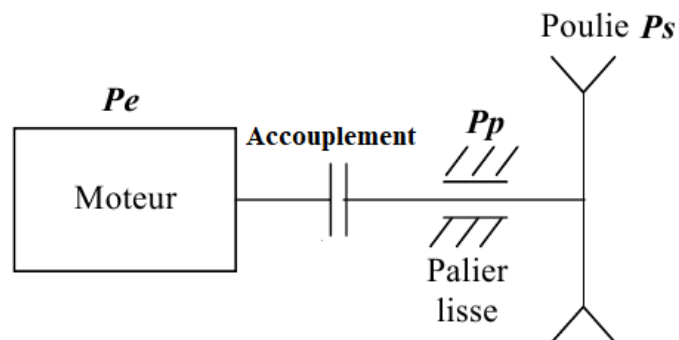


Figure 3 : Puissance perdue  $P_p$  dans le palier lisse

Le rendement réel est égal :

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_e - P_p}{P_e} ; \eta < 1$$

La puissance perdue  $P_p$  est calculée par la relation suivante :

$$P_p = P_e - P_s = fr. R. (d/2). \omega$$

Nous remarquons bien que la puissance perdue dépend du coefficient de frottement ( $f_r$ ) et de la réaction ( $R$ ) au niveau du palier, diamètre de l'arbre ( $d$ ) et sa vitesse angulaire ( $\omega$ ). Les facteurs ( $R$ ,  $d$  et  $\omega$ ) sont des paramètres imposés, le seul paramètre qui reste à changer pour minimiser la puissance perdue ( $P_p$ ) et diminuer l'usure et l'échauffement est le coefficient de frottement ( $f_r$ ).

Pour diminuer le coefficient de frottement entre l'arbre et le coussinet il faut :

- Avoir des surfaces de contact lisses.
- Utiliser des matériaux qui présentent de bonnes qualités antifriction comme le bronze, plomb, graphite, PTFE, polyamide, etc. Exemple :

Le coefficient de frottement entre acier-acier varie de 0,1 à 0,3 ; alors que pour acier-bronze varie de 0,03 à 0,2.

- Lubrifier les surfaces de contact.

#### 4. Paliers hydrodynamique

Il ressemble au précédent avec une principale différence : en fonctionnement normal il n'y a jamais contact métal sur métal entre l'arbre et le coussinet sauf au démarrage (voir figure 4). En effet, un film d'huile sépare les deux surfaces en contact durant le fonctionnement de la machine, par conséquent, les paliers peuvent tourner plus vite et plus longtemps. Dans ce type de paliers, le coefficient du frottement varie entre 0,002 et 0,01.

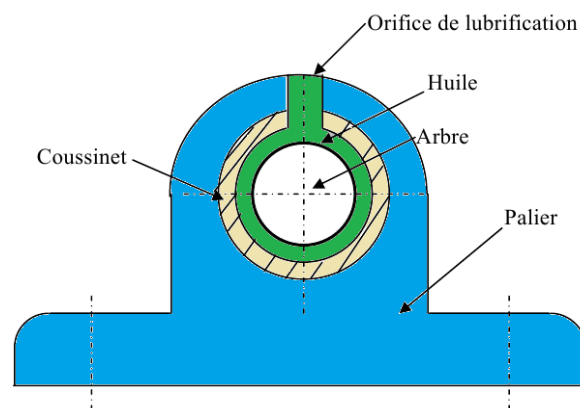


Figure 4 : Palier hydrodynamique

#### 5 Calcul des paliers lisses

Les bagues lisses ou coussinets doivent résister aux efforts appliqués sur l'arbre (réactions), permettre un rattrapage de l'usure et dissipent peu d'énergie par frottement pour avoir une puissance de sortie proche de la puissance d'entrée. Les coussinets sont calculés pour résister à la compression et pour éviter tout dégraissage du lubrifiant ou de grands échauffements du palier.

### a) Résistance à la compression

La Figure 5 présente la pression circonférentielle  $P$  appliquée par l'arbre sur le coussinet, celle-ci est due à la réaction  $R$  générée au niveau du palier.

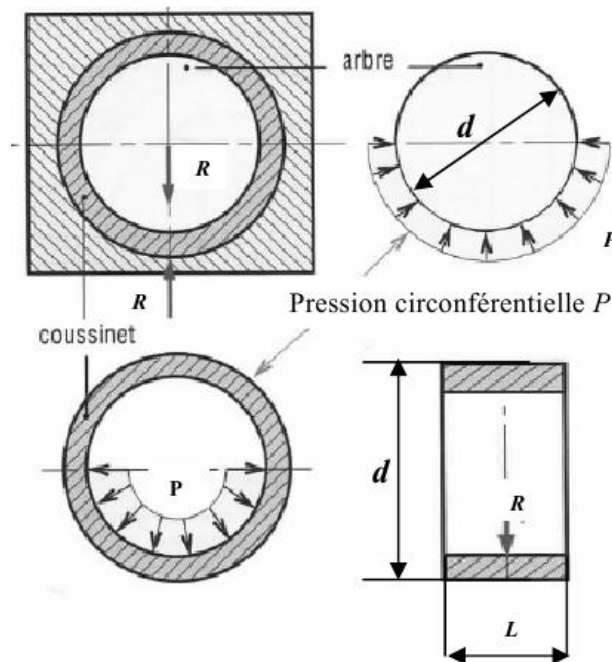


Figure 5 : Pression circonférentielle  $P$  de l'arbre sur le coussinet

Le critère de non compression du coussinet est :

$$P < R_{ec}$$

$$\text{Ou } \frac{R}{dL} < R_{ec}$$

$R_{ec}$  est la limite d'élasticité en compression du matériau du coussinet. Ce critère nous aide aussi à dimensionner le coussinet dans le calcul de sa longueur.

### b) Non dégraissage du lubrifiant

Si la pression  $P$  dépassera la pression admissible de l'huile existant entre les surfaces de contact, alors le film d'huile se rompra et un contact métal-métal s'établirait entre les surfaces de contact.

### c) Non échauffement du palier

L'échauffement qui est dû au frottement du coussinet avec l'arbre conduit à l'augmentation de la température de l'arbre et l'huile de graissage, cette température doit être inférieure à  $60^{\circ}\text{C}$  au voisinage des surfaces de frottements pour que le graissage reste efficace, sinon il peut se produire un grippage, c'est-à-dire une altération des surfaces de frottements. Ceci provoque

un arrêt de la machine et nécessite une réparation coûteuse et par fois même un remplacement des pièces. Le jeu radial entre l'arbre et le coussinet entraîne aussi un contact métal-métal et conduit à l'échauffement, grippage, rupture du film de graissage, guidage non précis...

Le calcul de la température entre les surfaces de contact est difficile car les valeurs des coefficients d'échange de la chaleur sont mal déterminées. On se contente donc à calculer le produit (P.V) qui tient en compte les facteurs essentiels de l'échauffement : La pression de l'arbre sur le coussinet (P) en (bar) et la vitesse relative (V) en (m/s) des surfaces de contact.

Le critère de non échauffement exige que :

$$(P \cdot V) < (P \cdot V)_{adm}$$

Le Tableau 1 suivant donne quelques valeurs du produit admissible  $(P \cdot V)_{adm}$  et le type du refroidissement correspondant.

Valeurs du produit $(PV)_{adm}$ (bar*m/s)	Type du refroidissement du palier
10 à 30	A l'aire
50	Courant d'air rapide
90	Circulation forcée d'huile
120	Circulation d'eau

Tableau 1 : Valeurs du produit PV admissible

## 6. Roulements

Le glissement avec frottement dans le cas des coussinets est remplacé par le roulement afin de diminuer le frottement.

La Figure 6 illustre un roulement à billes avec ses différentes composantes. La bague extérieure se positionne dans le logement du bâti et elle est liée à son alésage, la bague intérieure est liée à l'arbre, la cage maintient l'intervalle régulier entre les éléments roulants, les éléments roulants peuvent être soit des billes, des rouleaux ou des aiguilles.

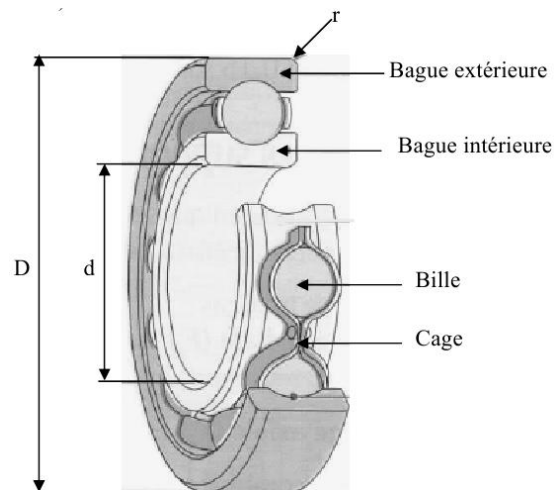


Figure 6 : Composantes d'un roulement à billes.

La bague intérieure tourne avec une vitesse  $N$ , tandis que la bille tourne avec une vitesse nettement plus faible à  $N$  (tr/min), le frottement de la bille avec la bague intérieure est trop faible car la surface de contact est faible et par conséquent la puissance dissipée par frottement ( $P_{pr}$ ) sera faible et elle est égale :

$$(P_{pr}) = Fr \cdot V_{bille}$$

$Fr$  est la force de frottement et  $V_{bille}$  est la vitesse de la bille. Les roulements sont fabriqués avec l'acier allié ou non allié possédant une limite d'élasticité élevée (100C6, 20NCD7, C60, etc.).

### 7. Types de roulements

Le Tableau 2, présente les différents types de roulements et les charges qui peuvent les supporter. En effet, les roulements sont construits pour supporter soit une charge radiale, ou une charge axiale ou une charge combinée (radiale et axiale).

Roulements	Nomination	Charges supportées par le roulement	Caractéristiques
	Roulement à une rangée de billes à contact radial	Supportent des charges axiales et radiales relativement importantes.	Exige une bonne coaxialité de l'arbre et l'alésage.
	Roulement à deux rangées de billes à contact radial	Supportent des charges radiales importantes et axiales modérées.	Exige une bonne coaxialité de l'arbre et l'alésage.
	Roulement à une rangée de billes à contact oblique	Supportent des charges axiales (dans un seul sens) relativement élevées et des charges radiales modérées.	Ils sont recommandés pour les grandes vitesses de rotation et exige une bonne coaxialité. Ils n'acceptent pas les défauts d'alignement.
	Roulement à deux rangées de billes à contact oblique	Supportent des charges radiales assez importantes et des charges axiales alternées (dans les deux sens).	Les vitesses de rotations admissibles sont inférieures à celles des roulements à une rangée de bille à contact oblique.
	Roulement à rotule sur deux rangées de billes	Supportent des charges radiales moyennes et des charges axiales faibles.	Ils sont utilisés lorsque l'alignement précis des paliers est difficile, ou dans le cas de flexion.
	Roulement à rouleaux coniques	Supportent des charges radiales et axiales (dans un seul sens) relativement importantes	Ils sont utilisés par paire et montés par opposition. Vitesses de rotation élevées et exige une bonne coaxialité. Possibilité de réglage du jeu de fonctionnement.

Roulements	Nomination	Charges supportées par le roulement	Caractéristiques
	Roulement à une rangée de rouleaux cylindriques	Ne supportent que des charges radiales élevées mais aucune charge axiale ou combinée.	Le contact se fait sur une ligne donc la charge radiale à supporter est élevée. Vitesses de rotation élevées et exige une bonne coaxialité.
	Roulement à rotule sur deux rangées de rouleaux cylindriques	Supportent des charges radiales élevées et des charges axiales alternées moyennes.	Frottement élevé impose lubrification à l'huile. Vitesses de rotation moyennes
	Butée à billes	Supportent que des charges axiales relativement importantes.	La vitesse de rotation est faible afin de diminuer la force centrifuge appliquée sur les billes. Ils sont utilisés pour les arbres verticaux, fortement chargés axialement et qui tournent lentement.
	Butée à aiguilles	Supportent que des charges axiales relativement importantes.	Il y a glissement et roulement en même temps. Ils sont sensibles au choc. L'encombrement est réduit.
	Roulement à aiguilles avec ou sans bague intérieure	Ne supportent que des charges radiales importantes mais aucune charge axiale ou combinée.	Ils permettent un léger déplacement axial (liberté axiale) de l'arbre par rapport au logement.

Tableau 2 : Les différents types de roulements



## 8. Choix des roulements

Le choix d'un roulement dépend de l'importance et la nature des charges : axiales, radiales ou combinée et de la vitesse de rotation qui est limitée par la chaleur dégagée par frottement, le choix dépend aussi de : la précision, la rigidité exigée et la coaxialité. On doit tenir compte des conditions de montage et démontage (accessibilité, mis en place, réglage), l'encombrement, la durée de vie souhaitée, la température de fonctionnement, désalignement et fléchissement des arbres, etc.

Le fléchissement et le désalignement des arbres figure 7, peuvent être dus à un effort important à l'arbre, l'importance de la portée (distance) entre les paliers ou un défaut d'alignement des paliers (non coïncidence des axes des logements).

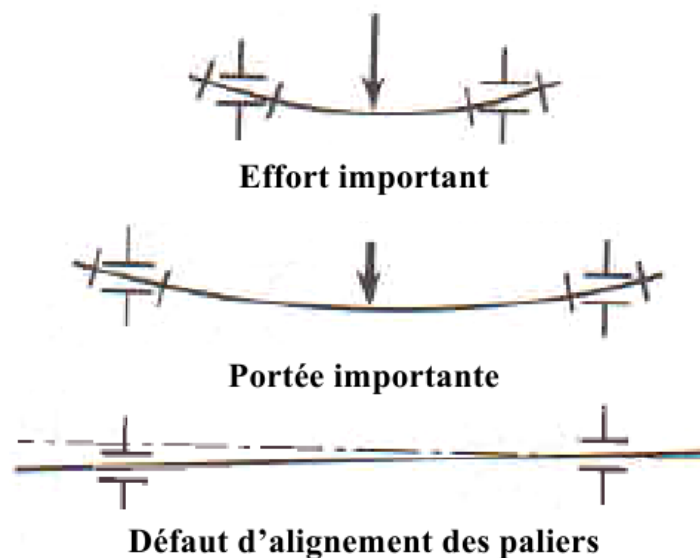


Figure 7 : Fléchissement de désalignement des arbres

## 9. Montage des roulements

Si la bague intérieure d'un roulement figure 8 est montée avec un jeu radial avec l'arbre tournant, alors les billes et l'arbre se comportent comme des rouleaux de laminoir et la bague intérieure risque d'être laminée, le laminage conduit à la détérioration progressive du roulement. Donc pour éviter ce phénomène, la bague intérieure doit être montée avec serrage, si le logement qui tourne, alors la bague extérieure devrait être aussi montée avec serrage.

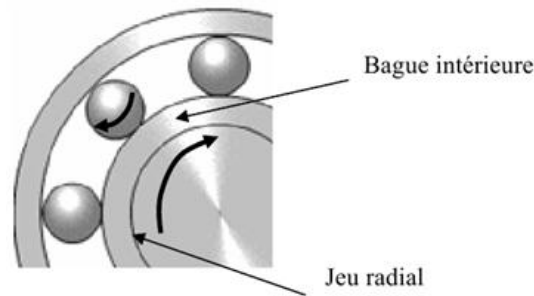


Figure 8 : Phénomène de laminage de la bague

Le montage de la Figure 9 montre les ajustements apportés à l'arbre et à l'alésage dans le cas d'un arbre tournant ou d'un alésage tournant. Dans le cas d'un arbre tournant, comme on a vu précédemment que la bague intérieure doit être montée avec serrage pour éviter le laminage de celle-ci, la bague extérieure dans ce cas doit être montée avec un jeu car si elle est montée avec serrage, le jeu entre les billes et les bagues diminue, le risque d'usure augmente et la capacité de charge du roulement risque aussi de diminuer. L'ajustement avec jeu de la bague extérieure dans le cas d'un arbre tournant préserve la possibilité de la mise en place du roulement dans l'alésage. L'opération du serrage des bagues avec l'arbre ou l'alésage se fait par une presse ou par frettage.

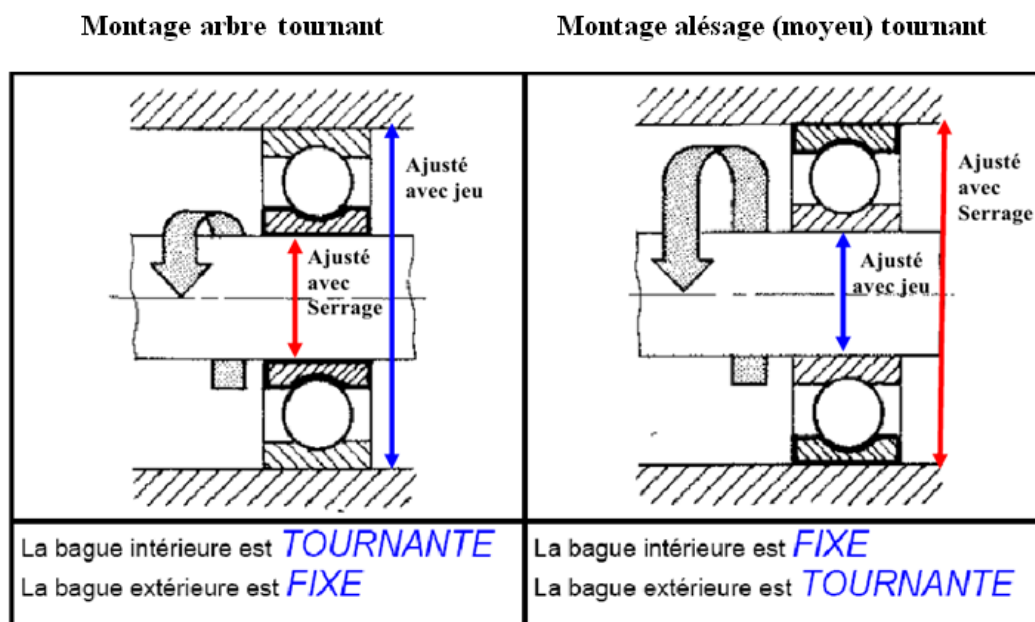


Figure 9 : Ajustement des bagues intérieures et extérieures dans le cas d'un arbre tournant et alésage tournant