

VI.1 Les Arbres

VI.1.1 Définition d'un arbre

Un arbre est un solide globalement de révolution, animé d'un mouvement de rotation autour de son axe, qui supporte généralement des éléments de transmission tels que, engrenages, poulies, volants, manivelles, pignons pour chaînes etc. L'arbre est un des éléments de machines fréquemment utilisé. Son rôle est multiple : En général, il sert à transmettre la puissance d'une partie de la machine à une autre, mais il peut aussi servir à assurer le positionnement d'un élément par rapport à un autre. A cause de sa géométrie et de ses fonctions, un arbre peut porter différents noms tels que :

- Arbre de transmission : il transmet un couple d'un moteur à une machine ou à un élément de machine.
- Arbre de renvoi : il supporte des éléments de machines (engrenages, poulies,...) et il transmet un couple entre chaque élément.
- Essieu : arbre stationnaire ou rotatif, qui ne transmet pas de couple, mais qui sert au positionnement.

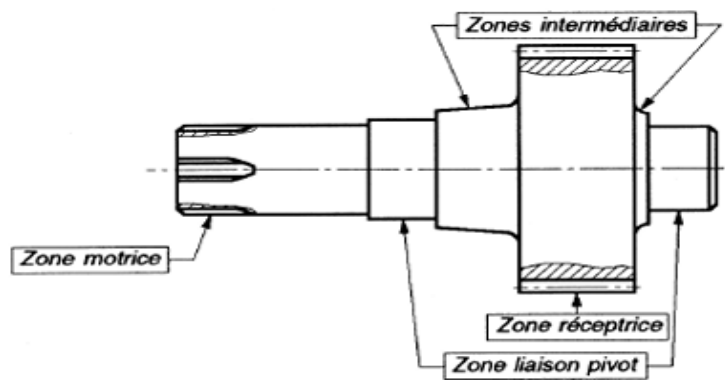


Figure IV.1 Zones caractéristiques d'un arbre

D'après les formes géométriques, on distingue les arbres droits, coudés (vilebrequin), flexibles. Les axes ne peuvent être que droits. Les arbres droits peuvent être : lisses, à gradin (dans la plupart des cas), à brides et à pignons.

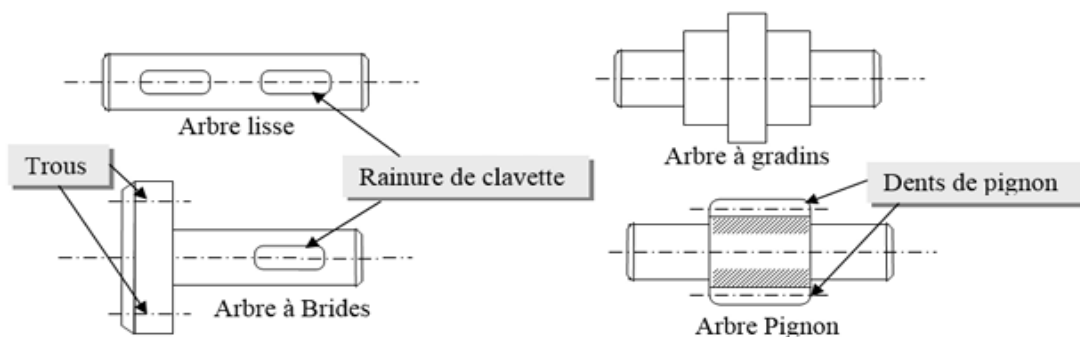


Figure IV.2 Types des arbres

D'après la forme géométrique de la section droite, les arbres et les axes peuvent être : pleins, creux, cannelés, etc.

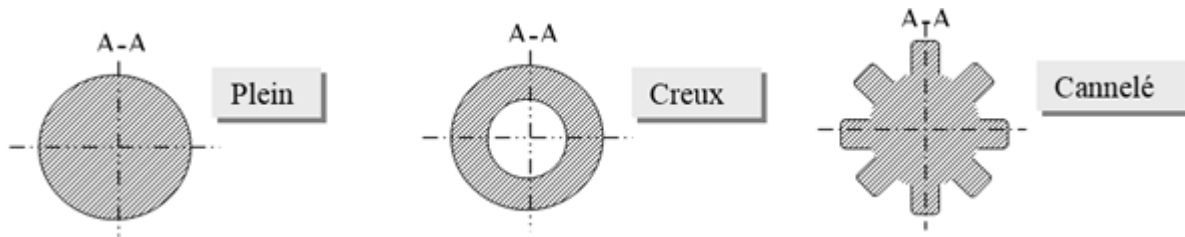


Figure IV.3 Section droite des arbres

Les parties d'appuis des arbres et des axes s'appellent tourillons. Les tourillons situés sur les bouts des arbres et subissent les réactions radiales s'appellent ergots. Les tourillons intermédiaires s'appellent collets. Les tourillons subissant les réactions axiales s'appellent pivots.

On distingue les ergots cylindriques, coniques et sphériques.

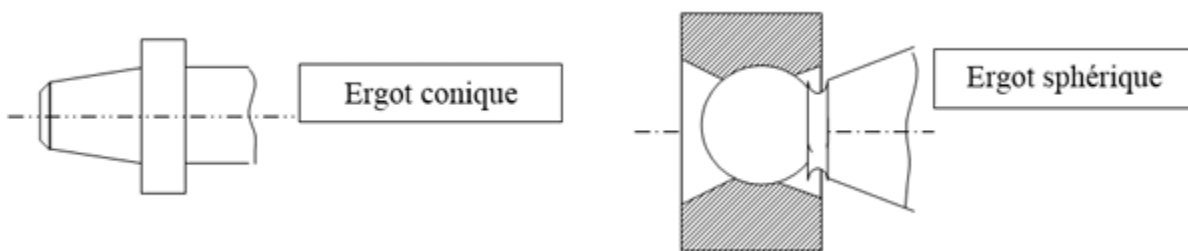


Figure IV.4 Les parties d'appuis des arbres et des axes

Suivant le rôle qui lui est affecté, l'arbre est soumis à des contraintes de flexion, de torsion ou à un chargement complexe de torsion, de flexion et charge axiale de traction ou compression. Le calcul de prédétermination d'un arbre se fait :

- à partir d'un calcul classique de RDM.
- à la résistance ;
- à la déformation
- à partir de la théorie de la fatigue ;
- à partir d'un calcul aux vibrations (vitesse critique).

Le critère choisi dépend de la géométrie et des spécifications imposées par la fonction éventuelle de l'arbre.

IV.2 Les Roulements

IV.2.1 Introduction

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

La Figure IV.5 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.

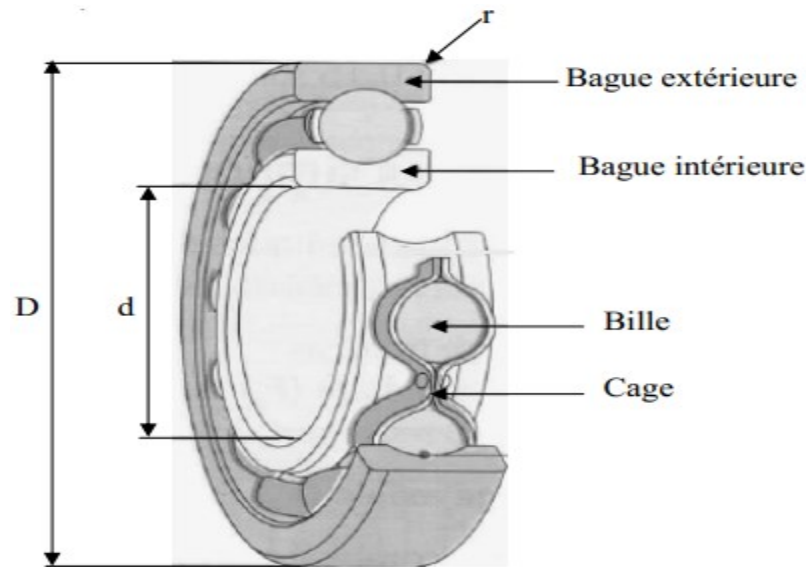


Figure IV.5 Composantes d'un roulement à billes

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 :

$$P_{pr} = F_r \cdot V_{bille} \quad (IV.1)$$

F_r 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, C60, etc).

IV.2.2 Types de roulements

Le Tableau IV.1 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 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.
	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.

Roulements	Nomination	Charges supportées par le roulement	Caractéristiques
	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 IV.1: Les différents types de roulements

IV.2.3 Symboles des roulements

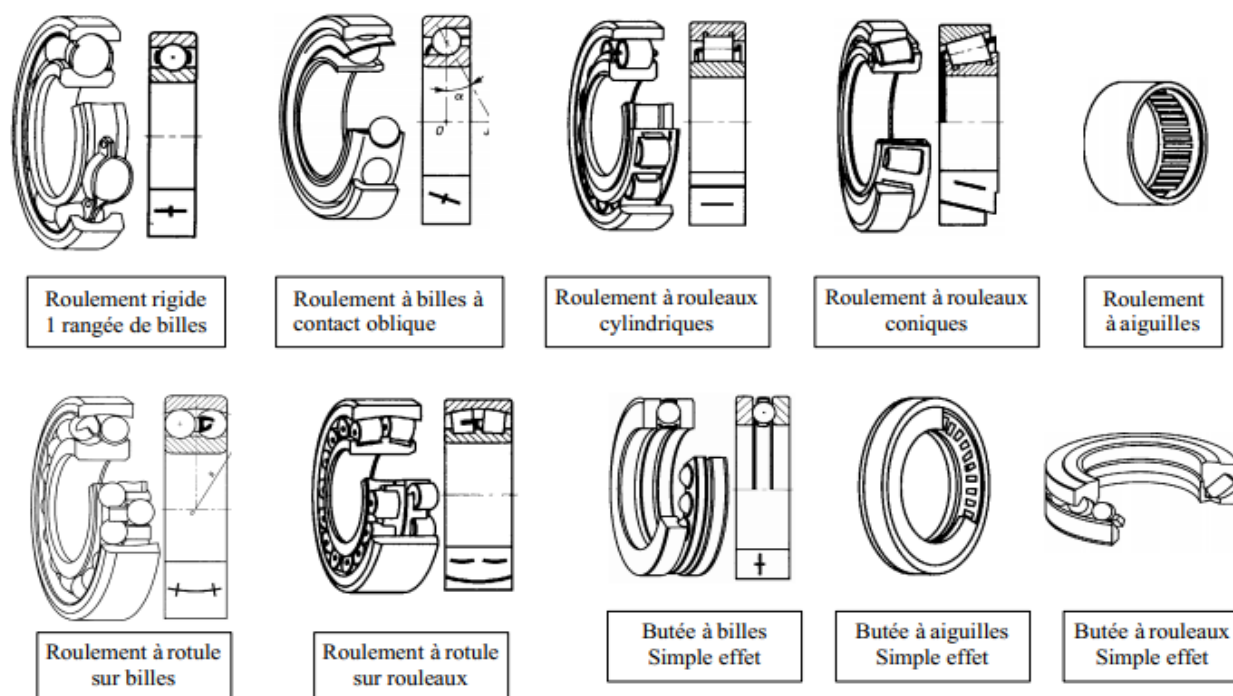


Figure IV.6 Symboles des roulements

IV.2.3.1 Représentations réelles et schématiques

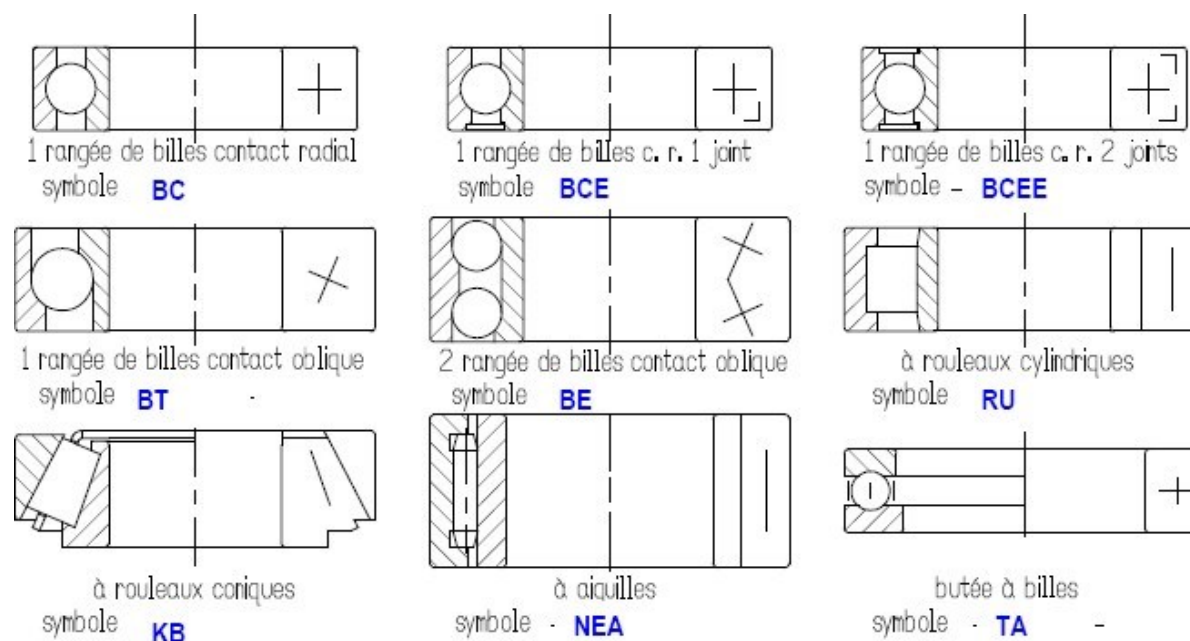
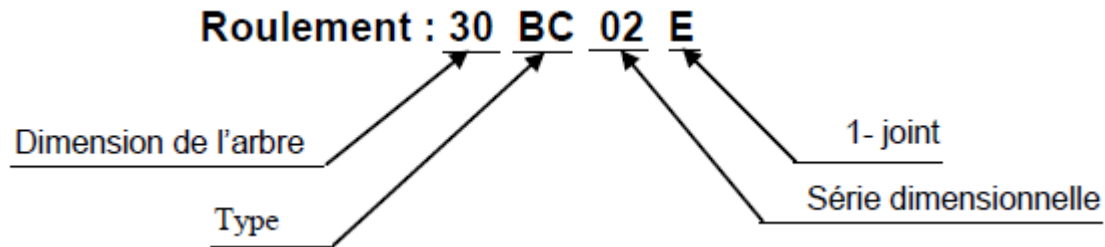


Figure IV.7 Représentations réelles et schématiques

IV.2.3.2 Désignation d'un roulement



IV.2.4 Charges supportées par les roulements

Les actions mécaniques de contact exercées par les éléments roulants sur l'une ou l'autre bague sont en général schématisées par des forces ou des charges (figure IV.8).

On observe trois cas : Axiale, Radiale, Combinée.

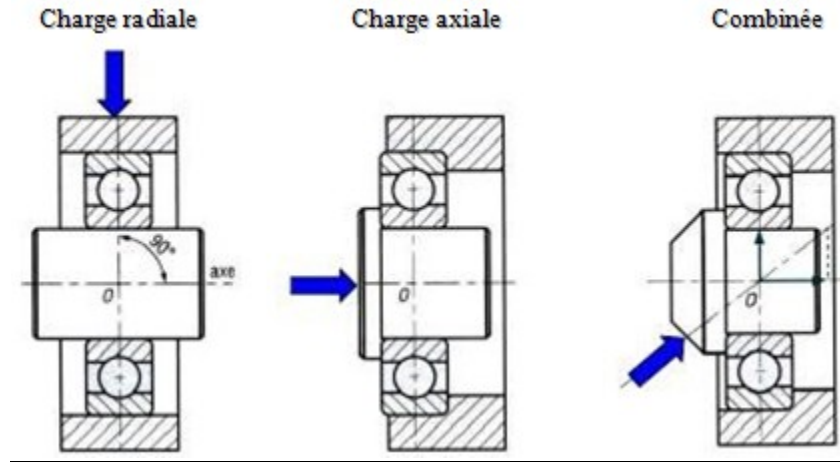


Figure IV.8 Charges supportées par un roulement.

IV.2.5 Choix des roulements

Le choix du type de roulements à utiliser dépend des exigences techniques propres à chaque cas (durée de vie exigée, importance des charges appliquées au roulement, place disponible, vitesse de rotation, températures de fonctionnement, jeux, précision, lubrification), et ne peut se faire que dans la connaissance parfaite des caractéristiques techniques de chaque type.

IV.2.6 Calcul et dimensionnement des roulements

IV.2.6.1 Durée de vie d'un roulement

La durée de vie d'un roulement est définie par le nombre de tours ou d'heures exigé, à une vitesse constante donnée, avant que le roulement ne montre les premiers signes de fatigue du matériau qui le compose.

$$L_h = \left(\frac{C}{P}\right)^n \cdot \frac{10^6}{60 \cdot N} \quad (\text{IV. 2})$$

Avec :

L_h : Durée de vie nominale en heures de fonctionnement.

C : la charge dynamique de base, N.

P : la charge dynamique équivalente, N.

n : exposant $n = 3$: pour – roulements à billes

$n = 10/3$: pour – roulements à rouleaux

N : le nombre de tours par minute.

Prenons deux groupes de roulements soumis à des conditions de charge différentes F_1 et F_2 , leurs durées respectives L_1 et L_2 peuvent être calculées par l'équation suivante :

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^n \quad (\text{IV. 3})$$

a)- Relation entre durée de vie L_{10} et la charge dynamique de base C

C'est la charge constante que supporte un roulement pour atteindre une durée de vie nominale de 1 millions de tours de la bague intérieure de ces roulements dont la bague extérieure est fixe. Pour des roulements radiaux, la charge nominale est une charge radiale appliquée au centre du roulement, avec une importance et une direction constante. Pour les butées, la charge nominale est un effort de poussée de valeur constante, parallèle à l'axe des roulements. La capacité de charge C des roulements NSK a été calculée suivant la méthode ISO 281.

Le rapport entre la charge de base dynamique du roulement, la charge appliquée et la durée de vie est donné par la formule suivante:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (\text{IV. 4})$$

Où :

L_{10} : Durée de vie nominale en millions de tours.

Si la charge P sur le roulement et la vitesse N sont connues, on peut déterminer le facteur dynamique approprié pour la durée de vie de la machine et alors calculer la charge dynamique de base au moyen de la formule suivante :

$$C = \frac{f_h \cdot P}{f_n} \quad (\text{IV. 5})$$

Où :

f_h : Facteur de durée de vie

f_n : Facteur de vitesse.

Un roulement qui satisfait cette valeur de C doit être choisi dans les catalogues.

b)- Charges dynamiques équivalentes

Lorsqu'un roulement est soumis simultanément à une force radiale et à une force axiale, la charge dynamique équivalente est donnée par :

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (\text{IV. 6})$$

Où :

F_r : Composante radiale de la charge, N.

F_a : Composante axiale de la charge, N.

X : facteur de charge radiale.

Y : facteur de charge axiale.

Les valeurs de X et Y se trouvent dans les tableaux dimensionnels de notre catalogue général.

Pour un roulement à billes à simple rangée, la charge axiale n'est pas prise en compte tant que le rapport F_a / F_r est inférieur à une certaine valeur e (voir tableau). Pour un roulement à deux rangées de billes la moindre charge axiale a une influence sur la charge équivalente.

Pour calculer un roulement donné, il est préférable d'utiliser les valeurs fournies par le manufacturier car elles ont été établies en fonction de la géométrie et du rapport F_a / F_r .

A partir des dimensions du roulement et le catalogue de constructeur, on détermine C_0 puis on calcul F_a / C_0 et on détermine ensuite les valeurs de e et Y correspondantes en utilisant le Tableau IV.2

$\frac{F_a}{C_0}$	0,014	0,028	0,056	0,084	0,110	0,170	0,283	0,42	0,5
X	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
Y	2,3	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44

Tableau IV.2 : Facteurs X et Y pour un roulement à billes à contact radial

P sera calculée alors en fonction des conditions suivantes :

Si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r (X = 1, Y = 0)$

Si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,56 \cdot F_r + Y \cdot F_a$

b)- Charge statique équivalente

Pour les roulements à l'arrêt ou tournant à de très petites vitesses ($n < 20 \text{ tr / min}$), on prend en considération la charge statique de base C_0 et la charge statique équivalente est déterminée comme suit :

$$P_0 = X_0 \cdot F_{0r} + Y_0 \cdot F_{0a} \quad (\text{IV.7})$$

Où :

F_{0r} : Charge statique radiale, (N)

F_{0a} : Charge statique axiale, (N)

X_0 : Facteur de charge statique radiale.

Y_0 : Facteur de charge statique axiale.

Les valeurs des facteurs X_0 et Y_0 sont données dans les tableaux dimensionnels.

Ceci est valable pour tous les roulements sauf pour les butées à rouleaux articulés chargées radialement et axialement, où :

$$P_0 = F_{a0} + 2,7 F_{r0} \quad (\text{IV.8})$$

La charge statique de base nécessaire est :

$$C_0 = P_0 \cdot f_s \quad (\text{IV.9})$$

P_0 : Charge statique équivalente (N).

f_s : Facteur correcteur.

$f_s \geq 2$: Pour des roulements soumis à des vibrations ou des chocs et aussi devant remplir des grandes exigences en précision $f_s = 1$, pour un fonctionnement normal, $f_s = 0.5 \dots 1$ pour un fonctionnement sans vibration.

IV.2.6.2 Fiabilité d'un roulement

Dans plusieurs cas d'utilisation, il est souhaitable de choisir un roulement d'une fiabilité autre que 90 %. Des études statistiques sur les faillites des roulements ont permis d'établir une relation entre la durée et la fiabilité. La fiabilité R peut être calculée par l'équation suivante :

$$R = \exp \left[- \left(\frac{L_{hR}}{m \cdot L_{10}} \right)^b \right] \quad (\text{IV.10})$$

Où :

L_{hR} : est la durée désirée, exprimée en nombre d'heures.

L_{10} : est la durée en heures par rapport à une fiabilité de 90%.

m, b : sont des constantes

IV.2.7 Montage des roulements

Si la bague intérieure d'un roulement Figure IV.9 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.

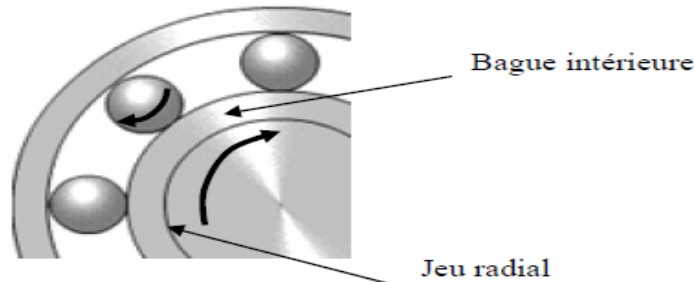


Figure IV.9 : Phénomène de laminage de la bague

IV.2.7.1 Le laminage

C'est l'usure de l'arbre ou du moyeu par frottement de la bague liée à la pièce mobile (moyeu ou arbre).

Deux solutions pour éviter ce problème :

- a)- Ajustement serré de la bague avec la pièce mobile.
- b)- Solution économique mais délicate à réaliser par collage.

IV.2.7.2 La dilatation

Le frottement même faible à l'intérieur du roulement provoque de la chaleur. De ce fait et du fait de la forme de l'arbre celui-ci se dilate beaucoup plus que le moyeu. Si les roulements sont montés serrés sur leurs deux bagues cette dilatation ne peut se faire et il y a usure très rapide des roulements.

a)- Les montages des roulements à une rangée de billes

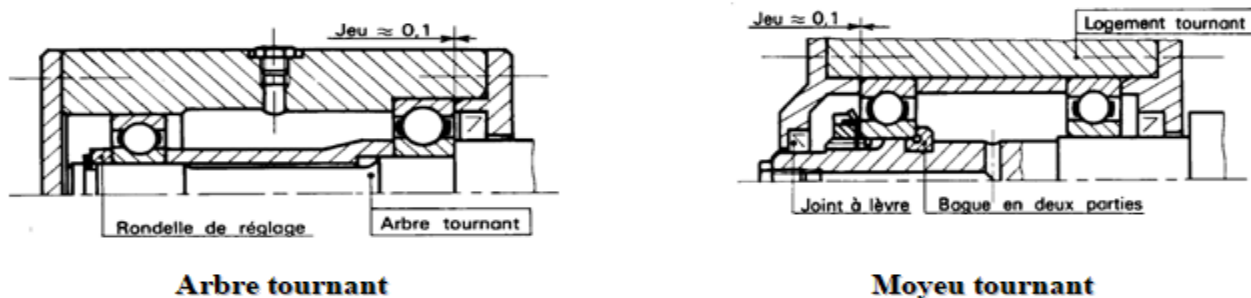


Figure IV.10 Les montages des roulements à une rangée de billes

b)- Les montages des roulements à rouleaux coniques ou à contact oblique:

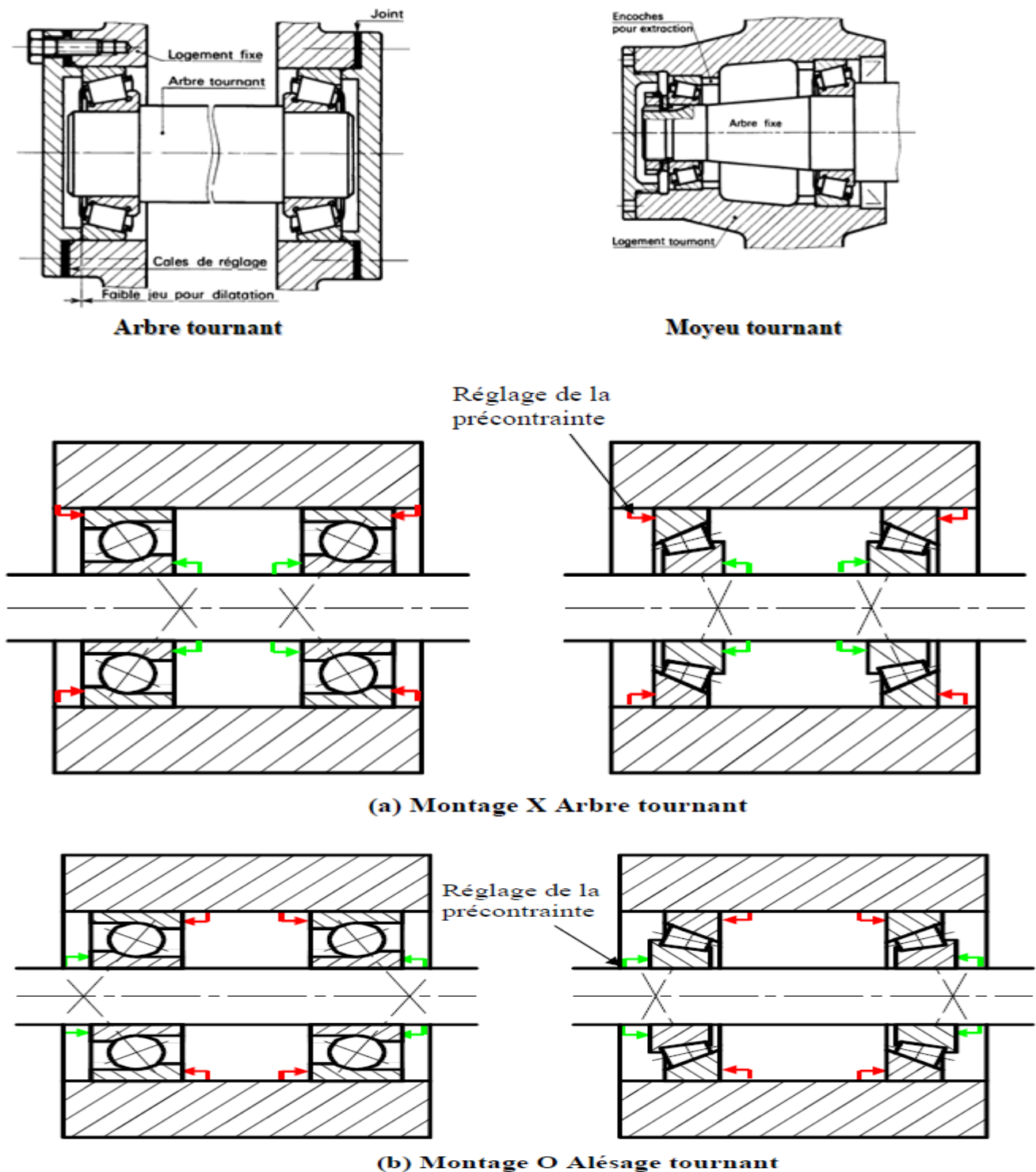


Figure IV.11 : Montage des roulements à rouleaux ou à contact oblique

IV.2.8 Lubrification des roulements

Le rôle du graissage dans le roulement est sa protection contre les piqûres de rouille, corrosion due à l'air et l'eau, empêcher la pénétration de la poussière, évacuer la chaleur, refroidir les composantes de roulement, réduire le frottement sur les chemins de celui-ci et faciliter les mouvements. Aux faibles températures on utilise une huile semi-fluide, pour les grandes températures, on utilise un lubrifiant un peu moins fluide (graisse). On peut trouver aussi des roulements qui sont graissés à vie.

IV.2.9 Etanchéité

Un roulement doit être protégé contre les poussières atmosphériques, particules métalliques, les abrasifs, eau, vapeur, etc. Il faut s'opposer aux pertes de lubrifiant, pour cela, il faut obturer autant que possible les paliers par l'utilisation des éléments d'étanchéité. Le choix du dispositif d'étanchéité dépend de la nature du lubrifiant (qui ne doit pas sortir) et du milieu ambiant (qui ne doit pas entrer) et de la vitesse de rotation.

IV.11 Avantages et inconvénients des roulements

Les *avantages* d'utilisation des roulements sont :

- Réduction de frottement entre l'arbre et l'alésage grâce aux billes.
- Support les charges radiales, axiales ou combinées et les grandes vitesses de rotations.
- Report de l'usure sur le roulement, ce qui protège l'alésage et l'arbre.
- Durée de vie élevée.
- Graissage moyen pas comme les paliers lisses qui demande assez de graisse ou huile pour assurer un bon fonctionnement.
- Montage et maintenance plus simplifiée par rapport aux paliers lisses.
- Assure un bon guidage (pas de jeu radial ou jeu axial et pas de décalage angulaire).

L'*inconvénient* principal de l'utilisation des roulements est que ceux-ci sont par fois bruyante et leur coût est un peu élevé.