

## Chapitre IV Calcul des Paliers lisses et roulements

### IV.1 Introduction

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

La Figure II.1 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.

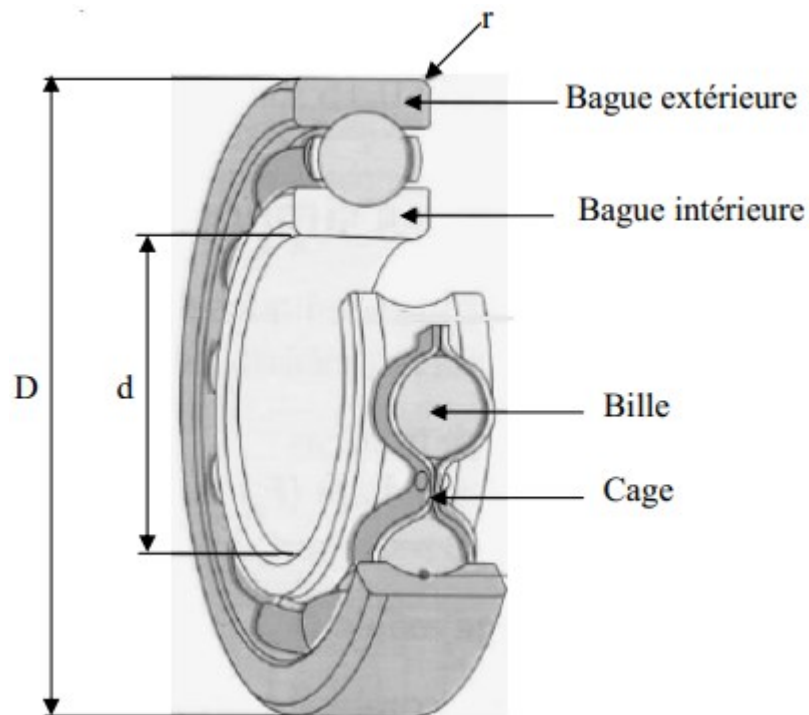


Figure II.1: Composantes d'un roulement à billes

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, 20NCD7, C60, etc).

## IV.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.3 Symboles des roulements

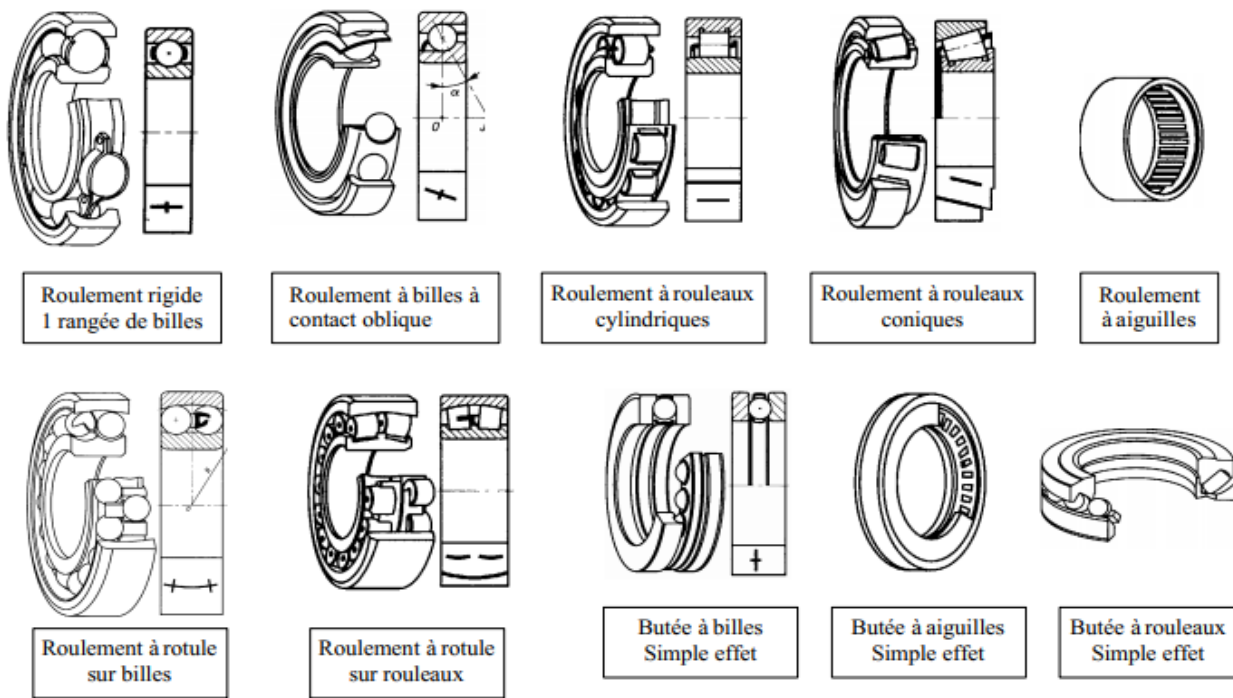


Figure IV.2 Symboles des roulements

#### IV.3.1 Représentations réelles et schématiques

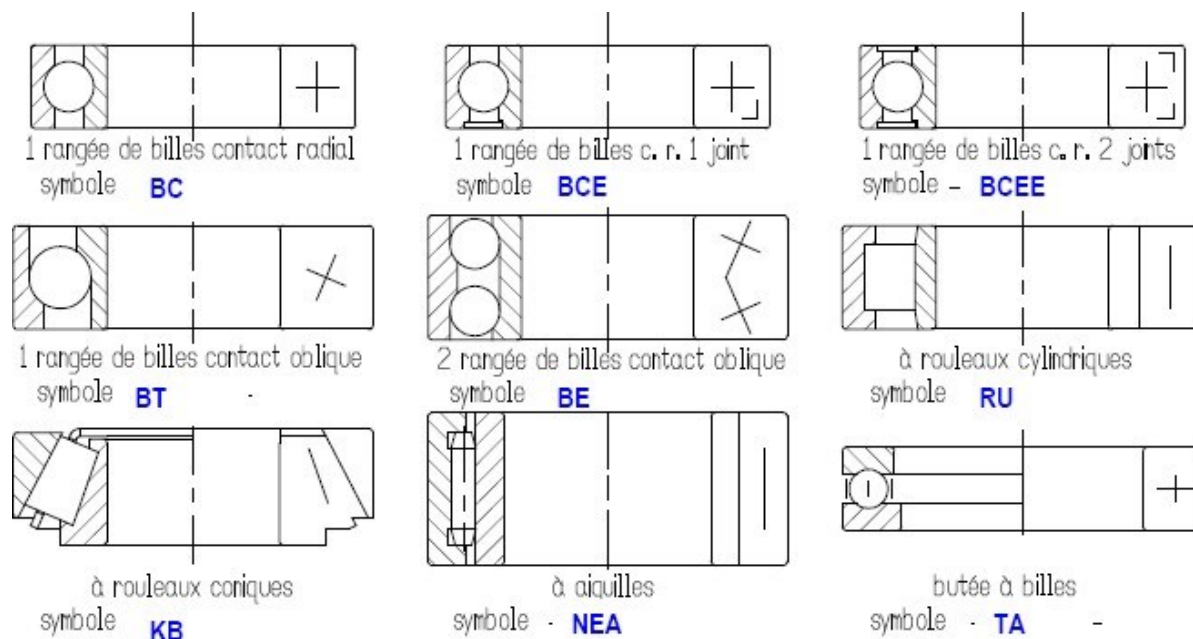
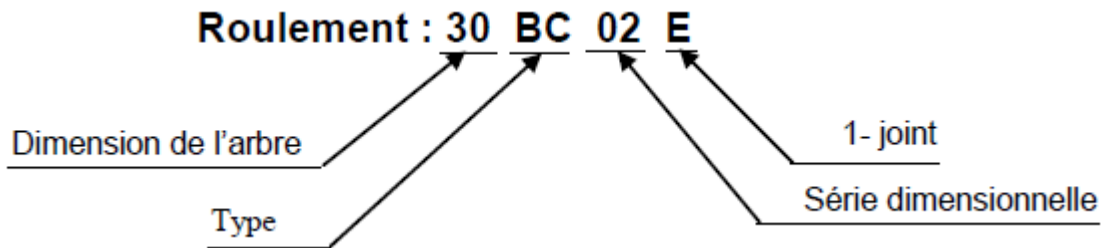


Figure IV.3 Représentations réelles et schématiques

### IV.3.2 Désignation d'un roulement



### IV.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.4).

On observe trois cas : Axiale, Radiale, Combinée.

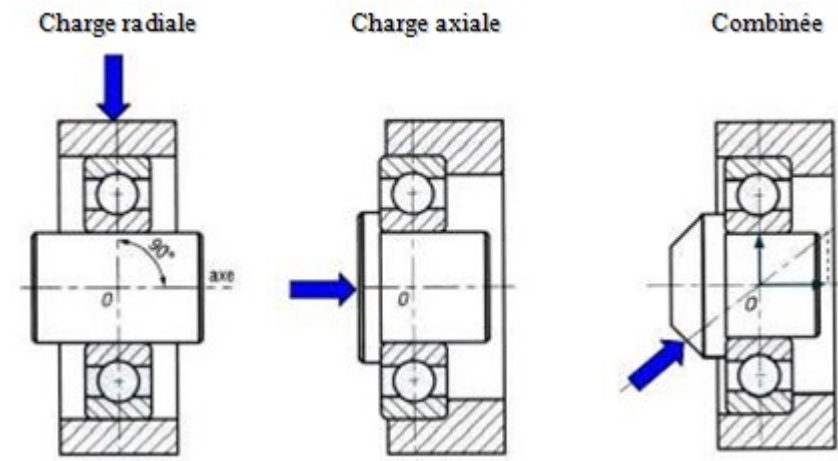


Figure IV.4 : Charges supportées par un roulement.

### IV.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.6 Calcul et dimensionnement des roulements

#### IV.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 heurs 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 :

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

Le taux de charge dynamique  $C$  a été défini comme suite :

$C$ 'est la charge radiale qui cause la faillite de 10 % des roulements avant un million de révolutions à la vitesse de 331/3 tours par minute, et ce, lorsque la bague intérieure tourne.

Les catalogues de roulements donnent la valeur de  $C$  en fonction des conditions normalisées. Pour choisir un roulement, on devra donc ramener les conditions d'opération aux conditions normalisées.

Pour déterminer le taux de charge dynamique «  $C$  » d'un roulement en fonction des conditions d'applications, sachant que :  $L_1 = \text{durée désirée} = N_d \cdot H_{10} \cdot 60$  (IV.4)

Ou  $N_d$  : Est la vitesse de rotation désirée d'une des parties du roulement, en nombre de tours par minute.

$H_{10}$  : Est le nombre d'heurs d'opération désirée à une fiabilité de 90%.

$$L_2 = 1 \times 10^6 = 331 / 3 \text{ tr / min } \times 500 \text{ heures } \times 60$$

$F_2$  : le taux de charge dynamique du roulement  $C$ .

$F_1$  : la charge radiale équivalente  $Re$

L'équation (II.3) s'écrit donc :

$$\frac{N_d \cdot H_{10} \cdot 60}{331/3 \cdot 500} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \quad (\text{IV.5})$$

Après réarrangement et simplification, le taux de charge dynamique du roulement  $C$  est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$C = P \cdot \left(\frac{N_d \cdot H_{10}}{331/3 \cdot 500}\right)^{1/n} \quad (\text{IV.6})$$

Cette équation permet de comparer les conditions d'opération à celles qui sont stipulées par le manufacturier. Le taux de charge est déterminé par rapport à une fiabilité de 90 % qui correspond à la durée nominale  $L_{10}$ .

## IV.6.2 Calcul des charges sur les roulements

En règle générale, les charges appliquées aux roulements sont une combinaison d'éléments tels que : poids de l'arbre et des pièces fixées sur celui-ci, transmission de puissance (courroies ou engrenages), vibration ou chocs et forces dynamiques (Forces centrifuges).

Chaque machine est plus ou moins génératrice de vibrations ou de chocs. L'évaluation des charges en résultant étant très complexes, il est préférable de se baser sur l'expérience acquise. La formule fait intervenir des facteurs de correction qui offrent une sécurité satisfaisante.

$$F_r = f_w \cdot F_{rc} \quad (IV.7)$$

$$F_a = f_w \cdot F_{ac} \quad (IV.8)$$

Avec :

$F_r, F_a$  : Charge appliquées sur le roulement en [N]

$F_{rc}, F_{ac}$  : Charges théoriques calculées en [N]

$f_w$  : Facteur de charge.

Pour le calcul de la charge théorique due à la transmission :

$$T = 9550 \frac{H}{n} \quad (IV.9)$$

$$F_{th} = \frac{T}{r} \quad (IV.10)$$

Avec :

T : couple transmis, N.m.

H : puissance transmise, kW.

n : vitesse de rotation, tr / min.

Fth : Effort théorique transmis, N.

r : rayon de l'élément transmetteur, m.

### 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:

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^n \quad (IV.11)$$

Où :

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

Si la charge  $P$  sur le roulement et la vitesse  $\eta$  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 :

$$C = \frac{f_h \cdot P}{f_n} \quad (IV. 12)$$

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 :

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (IV. 13)$$

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  $F_a / F_r$ .

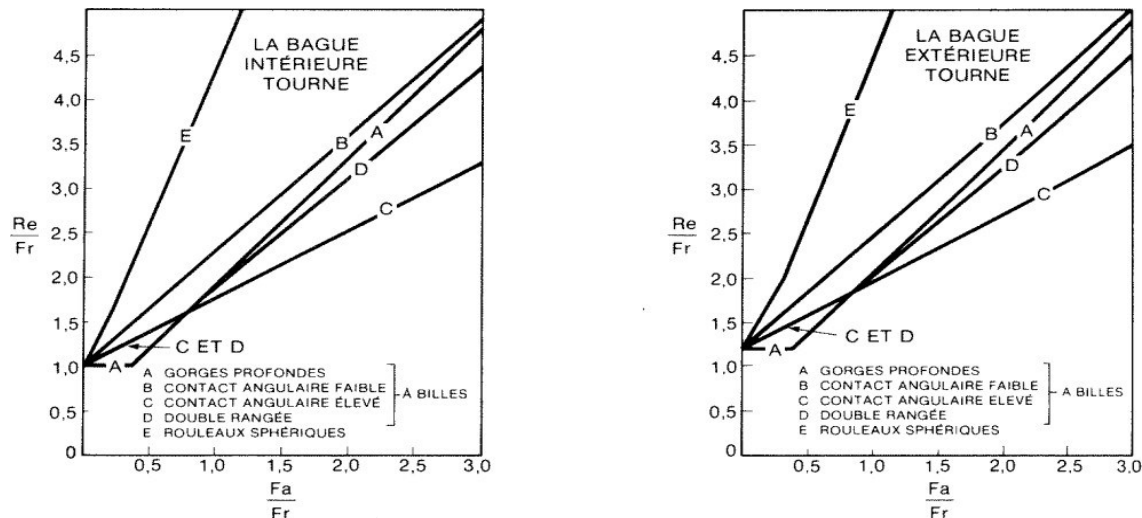


Figure IV. 5: Charges radiale équivalente pour divers roulements



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 :

$$P_0 = X_0 \cdot F_{0r} + Y_0 \cdot F_{0a} \quad (\text{IV.14})$$

Où :

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

$F_{0a}$  : Charge axiale statique, (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 :

$$P_0 = F_{a0} + 2,7 F_{r0} \quad (\text{IV.15})$$

La charge statique de base nécessaire est :

$$C_0 = P_0 \cdot f_s \quad (\text{IV.16})$$

$P_0$  : 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.6.3 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 :

$$R = \exp \left[ - \left( \frac{L_{hR}}{m \cdot L_{10}} \right)^b \right] \quad (\text{IV.17})$$

Où :

$L_{hR}$  : est le 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 constante

### IV.7 Montage des roulements

Si la bague intérieure d'un roulement Figure II.6 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.

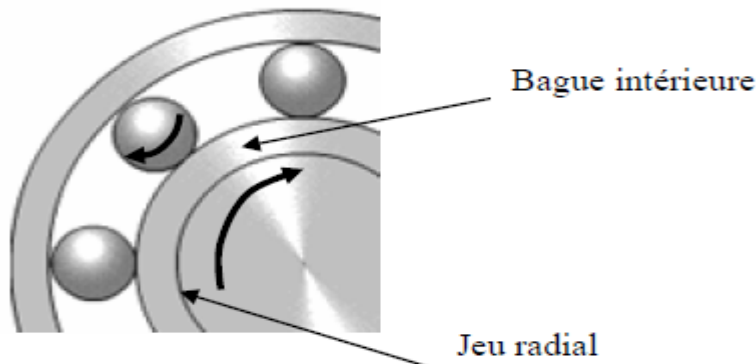


Figure IV.6 : Phénomène de laminage de la bague

#### IV.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.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 :

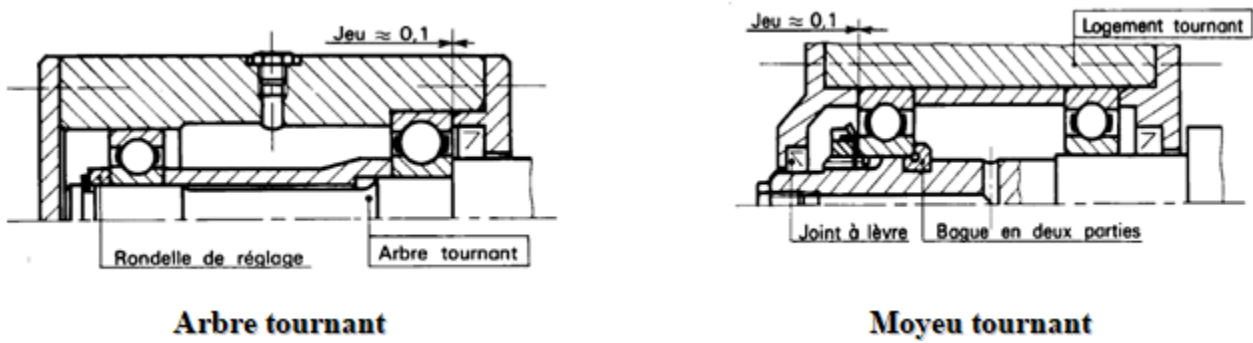
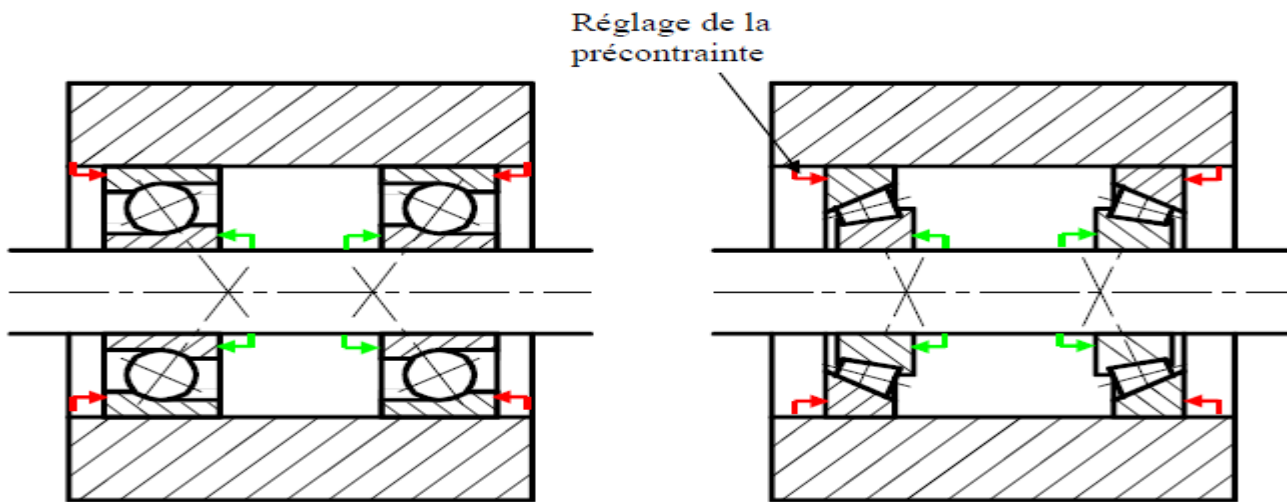
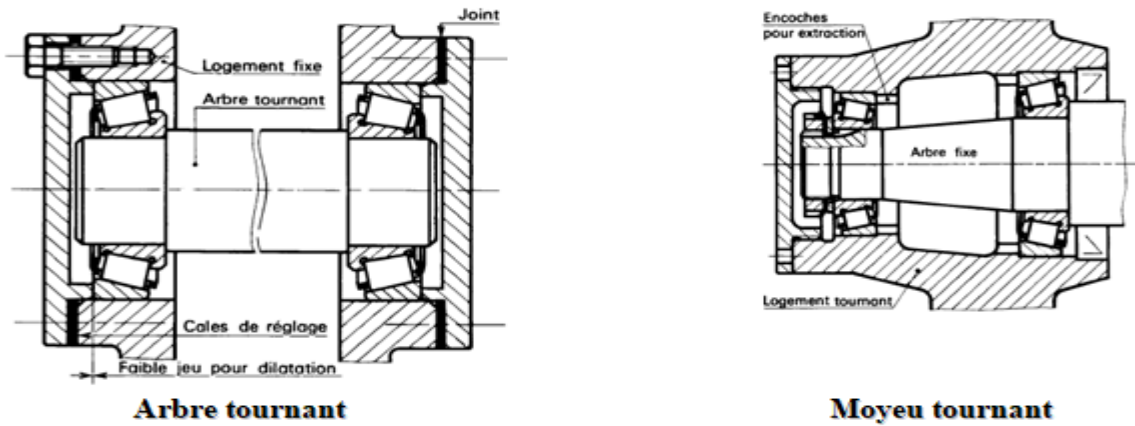
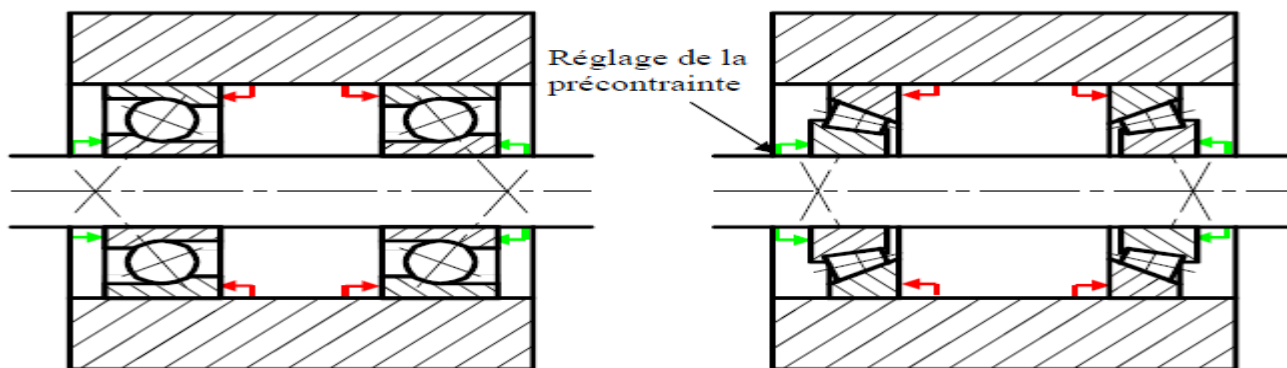


Figure IV.7 Les montages des roulements à une rangée de billes

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



(a) Montage X Arbre tournant



(b) Montage O Alésage tournant

Figure IV.8 : Montage des roulements à rouleaux ou à contact oblique

#### IV.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.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.10 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.

