

26

NOTIONS SUR LE CALCUL DES ROULEMENTS

OBJECTIFS

- Décrire et définir les notions de durée de vie, de défaillance, de capacité de charge et de charge équivalente.
- Indiquer la normalisation et proposer des exemples.

I - Fiabilité et durée de vie L_{10}

Sous charge et au cours du mouvement de rotation les chemins des bagues de roulements reçoivent de la part des éléments roulants, billes ou rouleaux, des millions de compressions élastiques intermittentes. Il en résulte, avec le temps, des fissurations amenant progressivement un écaillage des surfaces. C'est le phénomène de fatigue.

1. Durée de vie normalisée L_{10}

La durée de vie L_{10} d'une série de roulements identiques, soumis à la même charge, est égale au nombre de tours, ou de révolutions, réalisés par 90 % des roulements de la série avant qu'apparaissent les premiers signes de fatigue.

Unités : la durée de vie normalisée se calcule en millions de tours, parfois par commodité en heures de fonctionnement.

Remarques :

- La fatigue est un phénomène aléatoire ou statistique. Autrement dit, des roulements identiques, de mêmes dimensions, de mêmes matériaux, appartenant à un même lot, tous chargés de la même façon, auront, après le même essai, des durées de vie différentes (voir chapitre 14 : essais).

- L_{10} est la durée de vie (moyenne statistique) basée sur une fiabilité de 90 %, c'est-à-dire 90 % de survie après essai sur un même lot. L_{10} sert de référence à tous les roulements de la série.

2. Durée de vie corrigée L_n : fiabilité différente de 90 %

Si l'on désire obtenir une durée de vie L_n supérieure à L_{10} , ou à une fiabilité supérieure, celle-ci peut être obtenue par $L_n = a_1 \cdot L_{10}$.

Fiabilités différentes de 90 % $L_n = a_1 \cdot L_{10}$								
fiabilité F en %	90	95	96	97	98	99	99,5	99,9
L_n	L_{10}	L_5	L_4	L_3	L_2	L_1	$L_{0,5}$	$L_{0,1}$
a_1	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21	0,15	0,06

Remarques :

- La durée de vie moyenne (fiabilité de 50 %) d'un lot L_{50} est égale à environ 5 fois la durée L_{10} . Elle est de $15 \cdot L_{10}$ avec 10 % de survie.

- En pratique on utilise $L_n = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10}$

L'étude des coefficients correcteurs a_2 (liée à la géométrie et à la matière du roulement) et a_3 (fonction des conditions de fonctionnement : lubrification...) sort du cadre de cet ouvrage. Dans certains cas parfaitement bien maîtrisés, la durée de vie peut devenir infinie.

3. Fiabilité F et probabilité de défaillance D ($L < L_{10}$)

$$D = 1 - F \quad \text{avec} \quad F = \exp \left[- \left(\frac{(L/L_{10}) - 0,02}{4,439} \right)^{1,483} \right]$$

Exemple : la durée de vie prévue d'un roulement est $L_{10} = 10\,000$ heures. On souhaite connaître la fiabilité après 5 000 heures de fonctionnement juste avant extinction de la garantie commerciale.

$L = 5\,000$ et $L/L_{10} = 5\,000/10\,000 = 0,5$

L'équation précédente donne $F = 0,963\,7$ (fiabilité de 96,37 %)

Pourcentage de défaillance : $D = 1 - F = 0,036\,3$ (3,63 %).

4. Durée de vie d'un ensemble ou d'une association de roulements

Lorsqu'un ensemble de roulements (E) comprend plusieurs roulements fonctionnant en même temps (exemple : arbre avec plusieurs roulements), la durée de vie L_{E10} de l'ensemble est fonction de la durée de vie $L_{i,10}$ de chacun des n roulements. Elle est définie par la relation suivante :

$$L_{E10} = \left[\left(\frac{1}{(L_{1,10})} \right)^{1,5} + \left(\frac{1}{(L_{2,10})} \right)^{1,5} + \dots + \left(\frac{1}{(L_{n,10})} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}}$$

Exemple : deux roulements à rouleaux coniques d'un même arbre ont des durées respectives de 15 000 et 25 000 heures. Calculons la durée de vie probable du montage.

$$L_{E10} = \left[\left(\frac{1}{15\,000} \right)^{1,5} + \left(\frac{1}{25\,000} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}} = 11\,630 \text{ heures}$$

Cette durée est toujours inférieure à la plus petite des valeurs $L_{i,10}$, ici 15 000 heures.

II - Capacité de charge dynamique C

En dépit de l'utilisation d'aciers spéciaux très résistants, les roulements ont une durée de vie limitée. Cette durée dépend principalement de la charge supportée. Plus la charge est faible, plus la durée de vie est longue, et inversement.

Définition : la charge dynamique de base C , d'une série de roulements identiques, est la charge radiale (axiale pour une butée), constante en intensité et en direction, que peut endurer 90 % des roulements du groupe, pendant 1 million de tours, avant qu'apparaissent les premiers signes de fatigue.

Autrement dit, si un lot de 100 roulements identiques est soumis au cours d'un essai à sa charge de base C ($F_r = C$), 90 roulements du lot (90 %) auront une durée de vie qui atteindra ou dépassera 1 million de tours ($L_{10} = 1$).

Remarques :

- La capacité C est une des caractéristiques de base des roulements ; elle est indiquée dans les catalogues des fabricants en même temps que d, D, B et r .

- Pour une même référence normalisée de roulement, la valeur de C peut varier sensiblement d'un fabricant à l'autre.

III - Relation entre durée de vie L_{10} et charge dynamique C

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

L_{10} : durée de vie du roulement en millions de tours
 C : charge dynamique de base
 P : charge équivalente exercée sur le roulement (voir paragraphe IV)
 $n = 3$ pour les roulements à billes
 $n = 10/3$ pour les roulements à rouleaux

$$L_{10H} = \frac{L_{10} \cdot 10^6}{60 \cdot N}$$

Durée de vie L_{10H} en heures de fonctionnement
 L_{10} : millions de tours
 N : vitesse de rotation en tr/min.

Durées de vie indicatives de quelques paliers à roulements		
mode d'emploi	exemples d'emploi	durée de vie L_{10H}
usages intermittents	électroménager, outillages électroportatifs, automobiles, appareils de manutention et de levage, moteurs d'avions...	1 000 à 15 000
fonctionnant 8 heures par jour	véhicules industriels, machines-outils, machines agricoles, machines de production...	15 000 à 35 000
service en continu 24 heures 24	convoyeurs, compresseurs, certaines machines de production, ventilateurs, moteurs stationnaires	35 000 à 60 000
machines dont la fiabilité est très importante	machines à papier, machines textiles, navires, services des eaux, barrages...	100 000 à 200 000

Exemple : un catalogue de roulements donne, pour un roulement à billes à contact radial, une capacité de charge dynamique C égale à 6 300 daN. Le roulement supporte une charge P de 2 100 daN.

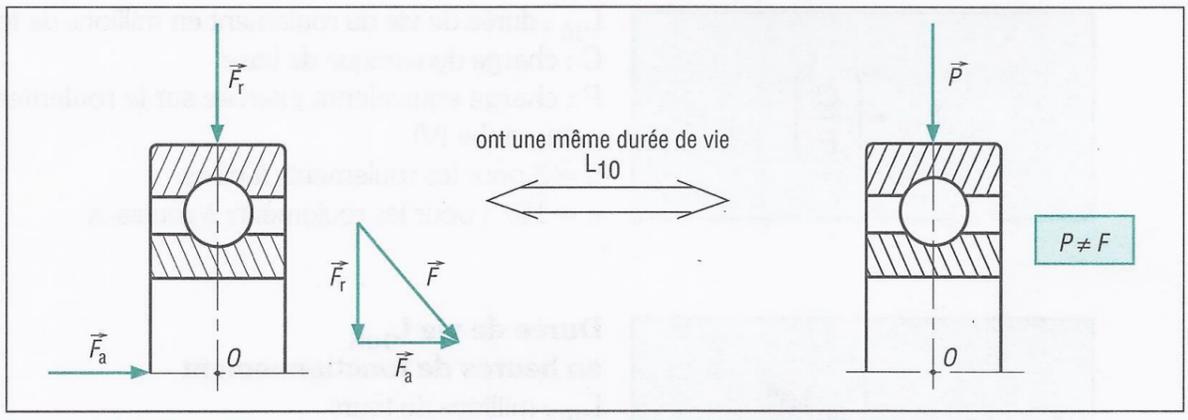
Déterminons les durées L_{10} et L_{10H} si la vitesse de rotation de l'arbre est de 150 tr/min.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^3 = \left(\frac{6\,300}{2\,100} \right)^3 = 3^3 = 27 \text{ (27 millions de tours)}$$

$$L_{10H} = \frac{27 \cdot 10^6}{60 \times 150} = 3\,000 \text{ heures}$$

IV - Calcul de la charge dynamique équivalente P

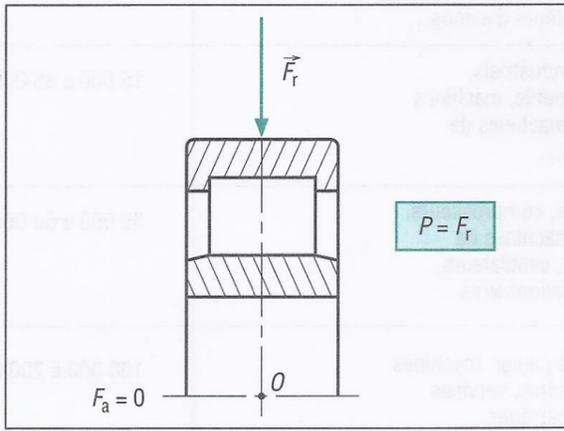
La charge équivalente P est une charge radiale pure, donnant exactement la même durée de vie que la combinaison charge axiale F_a plus charge radiale F_r réellement exercée sur le roulement. P est différent de la charge combinée F .



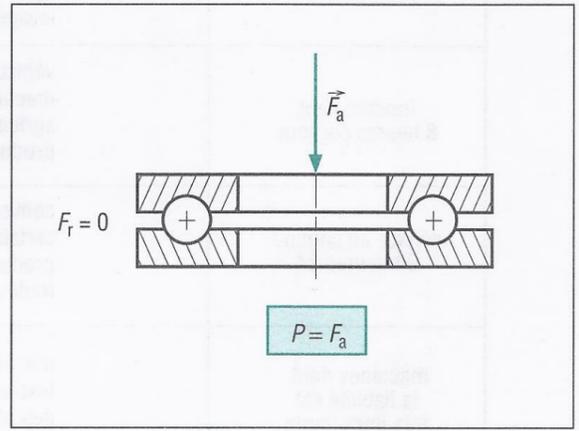
1. Charge équivalente P et charges exercées F_a et F_r .

1. Cas particuliers

Dans le cas des roulements à aiguilles et des roulements à rouleaux cylindriques avec bagues séparables : $F_a = 0$ et $P = F_r$.
 Avec des butées ne supportant que des charges axiales : $F_r = 0$ et $P = F_a$.



2. Valeur de P dans le cas des roulements à rouleaux cylindriques.



3. Valeur de P dans le cas des butées.

2. Cas général d'une charge combinée

F_a et F_r étant connues, la charge P est calculée à l'aide de la relation :

$$P = X.F_r + Y.F_a$$

X et Y sont des coefficients normalisés liés à la nature du roulement et à ses dimensions (tableau page 296).

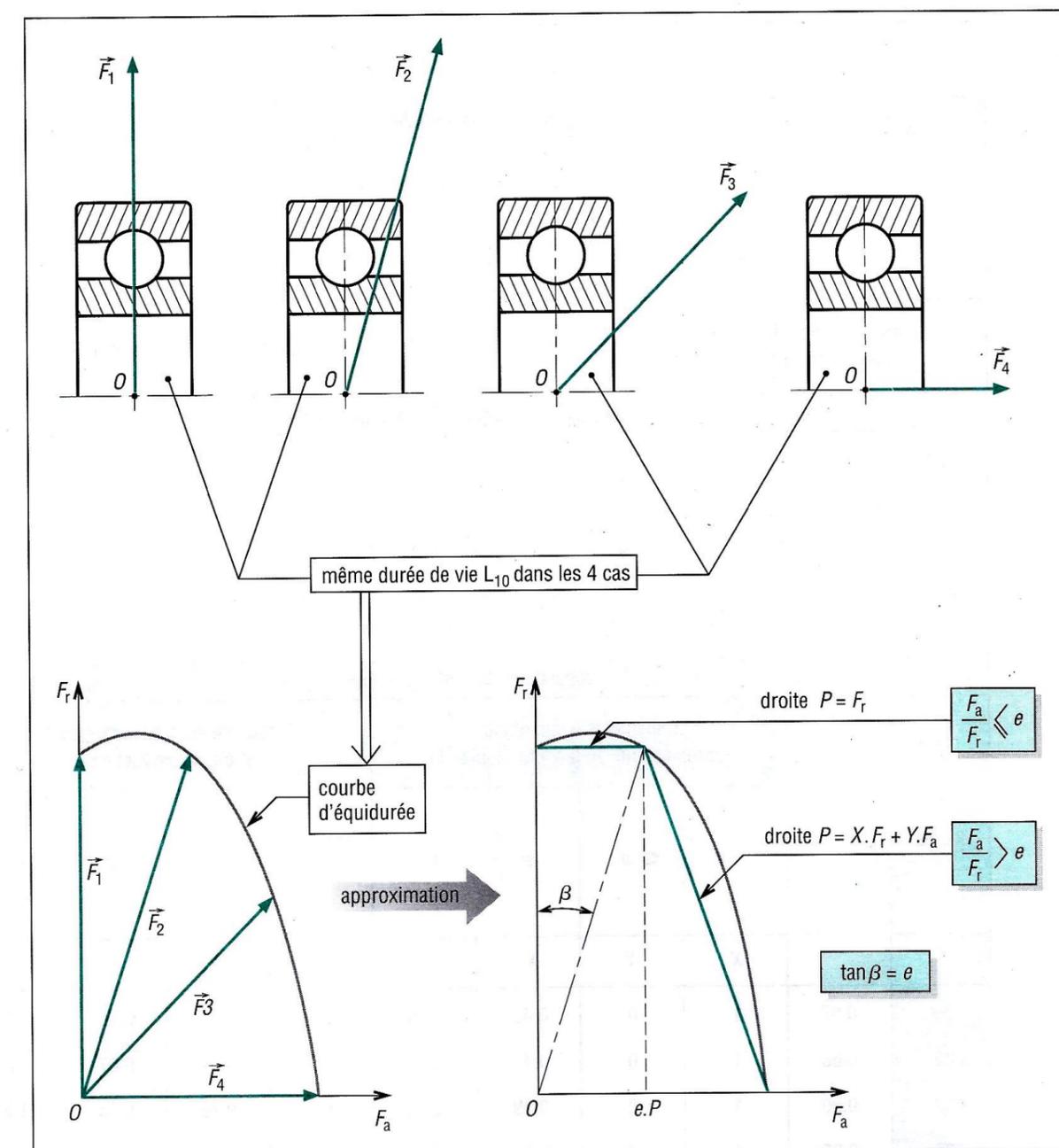
Remarques :

- Si la bague extérieure tourne par rapport à la direction de la charge la valeur de P est calculée

par :

$$P = 1,2.X.F_r + Y.F_a$$

- Les relations précédentes sont obtenues à partir des courbes expérimentales d'équidurée.



4. Principe des courbes d'équidurée.

Sous l'action des charges F_1, F_2, F_3 ou F_4 le roulement a la même durée de vie.

La courbe d'équidurée est obtenue en traçant la courbe passant par les extrémités des charges précédentes, toutes tracées à partir du même point d'application O .

Cette courbe est ensuite approximée par des droites pour en simplifier l'exploitation (permet de définir les coefficients $X, Y, e = \tan \beta \dots$).

Valeurs des coefficients X et Y

roulements à billes à contact radial

$$\text{si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \text{ alors } P = F_r$$

$$\text{si } \frac{F_a}{F_r} > e \text{ alors } P = 0,56.F_r + Y.F_a$$

les coefficients e et y ci-dessus dépendent du rapport $\frac{F_a}{C_0}$ (voir ci-dessous)

$\frac{F_a}{C_0}$	0,014	0,028	0,056	0,084	0,110	0,170	0,280	0,420	0,560
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44
y	2,30	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00

roulements à rotules

$$\text{si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \text{ alors } P = F_r + Y_1.F_a$$

$$\text{si } \frac{F_a}{F_r} > e \text{ alors } P = X.F_r + Y_2.F_a$$

billes : $X = 0,65$
rouleaux : $X = 0,67$

e, Y_1, Y_2 sont indiqués dans les tableaux de dimensions avec $d, D \dots$

roulements à rouleaux coniques à une rangée

$$\text{si } \frac{F_a}{F_r} \leq e \text{ alors } P = F_r$$

$$\text{si } \frac{F_a}{F_r} > e \text{ alors } P = 0,4.F_r + Y.F_a$$

e et Y sont indiqués dans les tableaux de dimensions avec d

roulements à contact oblique

α degrés	e	roulements à une rangée et roulements en tandem (duplex T)				roulements à deux rangées et duplex en X et O			
		si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$		si $\frac{F_a}{F_r} > e$		si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$		si $\frac{F_a}{F_r} > e$	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
20	0,57	1	0	0,43	1,00	1,0	1,09	0,70	1,63
25	0,68	1	0	0,41	0,87	1,0	0,92	0,67	1,41
30	0,80	1	0	0,39	0,76	1,0	0,78	0,63	1,24
35	0,95	1	0	0,37	0,66	1,0	0,66	0,60	1,07
40 *	1,14	1	0	0,35	0,57	1,0	0,55	0,57	0,93
45	1,33	1	0	0,33	0,50	1,0	0,47	0,51	0,81

pour les angles $\alpha < 20^\circ$ les valeurs de e et y dépendent de $\frac{F_a}{C_0}$
* la valeur $\alpha = 40^\circ$ est la plus courante

V - Capacité de charge statique C_0 et charge statique équivalente P_0

Pour un roulement chargé à l'arrêt, ou dans le cas de mouvements de faible amplitude et de petites oscillations, C_0 représente la charge statique limite à ne pas dépasser. Au-delà de cette charge, les déformations des éléments roulants deviennent inadmissibles.

La plupart des fabricants admettent une déformation maximale admissible égale à 0,0001 du diamètre moyen de l'élément roulant.

C_0 est une grandeur caractéristique du roulement indiquée dans les catalogues de fabricants en même temps que d, D, B, C...

Comme C, C_0 est une charge radiale pure. Si le roulement est soumis à une charge combinée F_a plus F_r , il est nécessaire de calculer au préalable la charge statique équivalente P_0 (analogie avec P).

$$P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a$$

avec $P_0 \cdot s_0 \leq C_0$

$0,5 \leq s_0 \leq 0,8$: cas de faibles exigences (régulier et sans chocs).

$0,8 \leq s_0 \leq 1,2$: cas d'exigences normales.

$1,2 \leq s_0 \leq 2,5$: cas d'exigences sévères (chocs...).

Remarque : si le roulement est soumis à une charge radiale pure F_r alors $P_0 = F_r$ avec $P_0 \cdot s_0 \leq C_0$.

Valeurs normalisées des coefficients X_0 et Y_0 (NF ISO 76)						
type de roulements		roulement à 1 rangée		roulement à 2 rangées		
		X_0	Y_0	X_0	Y_0	
roulements à billes	à contact radial		0,6	0,5	0,6	0,5
	à rotules		0,5	$0,22 \cdot \cotg \alpha$	1	$0,44 \cdot \cotg \alpha$
	à contact oblique	$\alpha = 15^\circ$	0,5	0,46	1	0,92
		$\alpha = 20^\circ$	0,5	0,42	1	0,84
		$\alpha = 25^\circ$	0,5	0,38	1	0,76
		$\alpha = 30^\circ$	0,5	0,33	1	0,66
		$\alpha = 35^\circ$	0,5	0,29	1	0,58
		$\alpha = 40^\circ$	0,5	0,26	1	0,52
	$\alpha = 45^\circ$	0,5	0,22	1	0,44	
roulements à rouleaux	à rouleaux coniques		0,5	$0,22 \cdot \cotg \alpha$	1	$0,44 \cdot \cotg \alpha$
	à rotules		0,5	$0,22 \cdot \cotg \alpha$	1	$0,44 \cdot \cotg \alpha$