

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

A.VI. Dimensionnement des roulements

A.VI.1 Dimensionnement statique

A.VI.1.a Charge statique de base du roulement C_0

A.VI.1.a.i Introduction

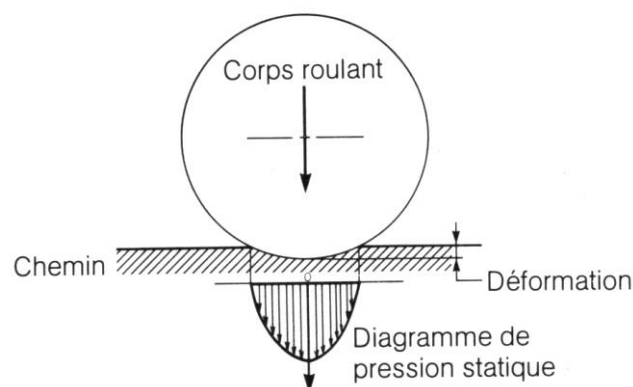
Certaines applications peuvent imposer au roulement des conditions de fonctionnement très particulières :

- Arrêts prolongés sous charge
- Rotation lente sous charge
- Oscillations lentes sans rotation complète (pont roulant, pivot, palan ...)

Il est alors soumis à une charge statique qui, du fait des contraintes au niveau des contacts des corps roulants avec les chemins, peut engendrer des déformations permanentes localisées nuisibles au bon fonctionnement du roulement lorsqu'il est en rotation. Il est donc nécessaire de définir pour chaque roulement une charge radiale maximale admissible telle que la contrainte qui en résulte dans le roulement immobile puisse être tolérée dans majorité des applications sans que sa durée de vie et sa rotation en soient altérées.

La valeur C_0 de cette charge maximale admissible est appelée **charge statique de base** du roulement (ou capacité statique).

La charge statique de base d'un roulement a été définie par la Norme ISO 76 de 1978 comme "la valeur de la charge radiale (axiale pour les butées) qui provoque une déformation permanente totale (corps roulant et chemin) au contact le plus chargé, égale au 1/10 000 du diamètre du corps roulant".



Cette définition ne donnait pas des valeurs très homogènes en passant d'un type de roulement à un autre. Aussi, la Norme ISO 76 a-t-elle été révisée et un nouveau critère a été pris en compte (et appliqué dans le présent catalogue)

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

A.VI.1.a.ii Définition

La charge statique de base C_0 est définie comme la charge radiale (axiale pour les butées) qui crée au niveau du contact (corps roulant et chemin) le plus chargé une pression de Hertz de :

- 4200 MPa pour les roulements et butées à billes (tous types, sauf roulements à rotule sur billes).
- 4600 MPa pour les roulements à rotule sur billes.
- 4000 MPa pour les roulements et butées à rouleaux (tous types).

La valeur de C_0 est donnée dans les catalogues de roulements.

A.VI.1.b Charge statique équivalente P_0

Dans le cas où le roulement est soumis à des charges statiques combinées telles que :

- F_r est la composante radiale
- F_a est la composante axiale

On calcule une charge statique équivalente P_0 afin de la comparer à la capacité statique du roulement. Sa valeur est la plus grande des deux valeurs obtenues à partir des formules suivantes :

Charge radiale pure	Charge combinée
$P_0 = F_r$	$P_0 = X_0 F_r + Y_0 F_a$

Les coefficients X_0 et Y_0 figurent dans les tableaux de caractéristiques des roulements.

Valeurs normalisées des coefficients X_0 et Y_0						
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				1	$0,44.\cotg \alpha$
	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		0,6	$0,22.\cotg \alpha$	1	$0,44.\cotg \alpha$
	à rotules				1	$0,44.\cotg \alpha$

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

La capacité de charge statique du roulement est à considérer plus comme un ordre de grandeur qu'une limite précise à ne pas dépasser. Si le roulement est soumis à des exigences normales de vitesse et de précision de rotation, il ne devra être chargé qu'à environ 0,5 fois sa capacité statique. A l'inverse, dans les cas de rotation lente ou d'oscillations sans exigence de précision, il pourra être chargé jusqu'à deux fois sa capacité statique.

On écrit donc :

$$S_0 P_0 = C_0$$

On calcule alors S_0 :

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0}$$

Puis on compare sa valeur à celles du tableau suivant :

Pas de chocs	Fonctionnement normal	Chocs
$0,5 < S_0 < 0,8$	$0,8 < S_0 < 1,2$	$1,2 < S_0 < 2,5$

Remarque : « Qui peut le plus peut le moins ». Si $1,2 < S_0 < 2,5$, le fonctionnement sans chocs est vérifié.

A.VI.2 Dimensionnement dynamique

Pour les roulements qui ont une vitesse de rotation significative, le calcul de dimensionnement se fait à la durée. La détérioration de ces roulements est dû au phénomène de fatigue.

A.VI.2.a Phénomène de fatigue

En fonctionnement normal sous charge, les surfaces actives d'un roulement sont soumises à des contraintes alternées très élevées dues aux passages successifs des corps roulants sur les chemins. Les contraintes de compression peuvent atteindre 3500 MPa et les contraintes de cisaillement 1000 MPa. Elles finissent par créer, à plus ou moins long terme, des fissurations par fatigue de la matière.

Ces fissures naissent en général en sous-couche et se propagent vers la surface. Elles provoquent alors le détachement d'écailles d'acier - phénomène qu'on appellera l'écailage. Le chemin de roulement se trouve alors endommagé, le roulement perd rapidement ses propriétés initiales, et n'est donc plus en mesure d'assurer son service.

L'écailage s'explique par l'imperfection de la structure de l'acier qui contient toujours des micro-inclusions, lesquelles facilitent, à plus ou moins long terme, l'initialisation de la fissuration. Même s'il est difficile de les détecter en laboratoire, ces inclusions existent. Le roulement aura une résistance à la fatigue d'autant plus grande que l'acier qui le compose sera fin et homogène - c'est-à-dire que les micro-inclusions seront petites et dispersées.

La détérioration par fatigue d'un roulement en fonctionnement dans des conditions normales de charge, vitesse, température et désalignement est cependant un phénomène normal et inéluctable.

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

Le problème posé par ce **phénomène de fatigue** est son **aspect aléatoire**, qui en rend l'étude difficile. En effet, des roulements identiques, fabriqués à partir d'un même lot de matière, ayant des caractéristiques géométriques identiques, soumis à des conditions de fonctionnement identiques (charges, vitesse, lubrification) se détériorent après des durées de fonctionnement très différentes. Cet aspect étant connu, il s'agit donc d'établir la probabilité de fatigue d'un lot de roulements. Cette étude est celle d'un phénomène aléatoire : la durée de vie n'est pas une donnée de précision, mais une **notion statistique**.

A.VI.2.b Durée de vie des roulements

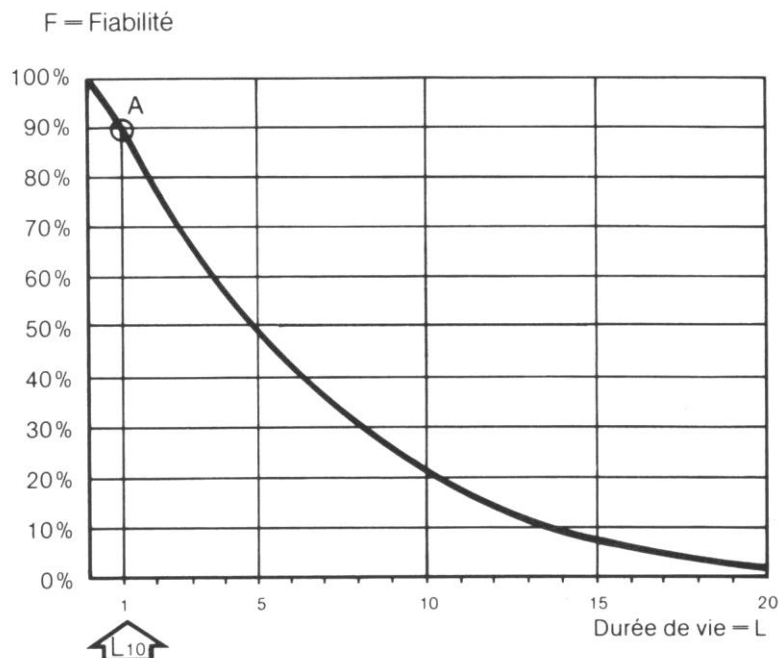
A.VI.2.b.i Durée de vie nominale

On définit la durée de vie d'un roulement comme le nombre de révolutions accomplies par celui-ci jusqu'au premier signe d'écaillage.

L'étude expérimentale de la durée de vie d'un même lot représentatif, fonctionnant à jeu nul, sous la même charge radiale (l'étendue de la zone de charge étant donc voisine de 180°) a permis d'établir que ce phénomène suit une loi statistique caractéristique.

La courbe de fiabilité représente la durée de vie L , en fonction du pourcentage des roulements du lot ayant atteint celle-ci.

Courbe de fiabilité (pourcentage des roulements d'un même lot ayant atteint une durée de vie donnée L)



La norme ISO 281 définit comme **durée de vie nominale, dite durée L_{10}** , celle qui est atteinte par 90 % des roulements essayés dans les mêmes conditions (point A). La durée nominale L_{10} correspond donc à une fiabilité de 90 % et à une probabilité de défaillance de 10%

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

La courbe de fiabilité présente une allure caractéristique typique de tout ce qui touche à la fatigue des métaux.

Elle rend compte de la grande dispersion caractéristique de la durée de la vie des roulements : 50% environ des roulements d'un même lot atteignent une durée égale à cinq fois la durée nominale L_{10} et 10 % environ une durée égale à 15 fois la durée nominale L_{10} . Compte tenu de cela, on comprend facilement que l'analyse des performances des roulements ne peut se faire qu'à la suite de plusieurs essais identiques, et seule l'exploitation statistique des résultats permet de tirer des conclusions valables.

A titre indicatif, voici quelques durées souhaitées en fonction du type de système.

Durée indicative d'un roulement ou d'une butée	
Types de machines	Durée L_h (heures)
Machines à usage intermittent :	
Appareils de démonstration	30
Petits outillages...	500
Appareils ménagers	4 000
Appareils de levage, de chargement	à
Outillages à main...	8 000
Machines-outils assez peu utilisées	8 000
Machines agricoles	à
Transporteurs	15 000
Machines fonctionnant 8 h par jour	
Machines-outils	15 000
Machines de production	à
Réducteur	
Ventilateurs	30 000
Machines en service continu	
Compresseurs	30 000
Pompes	à 60 000
Machines à papier	
Machines textiles, navires de commerce	100 000

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

A.VI.2.b.ii *Charge radiale dynamique de base - Capacité de charge - C*

Pour caractériser l'aptitude de chaque roulement à supporter les phénomènes de fatigue, la norme ISO 281 définit une **charge radiale dynamique de base C**, appelée aussi communément capacité de charge, qui représente la charge radiale particulière correspondant à une durée de vie nominale **L_{10}** de **un million de tours**.

Lorsque le roulement fonctionne sous **charge radiale P**, avec un jeu pratiquement nul, de telle sorte que la charge est répartie sur la moitié de ses corps roulants, sa durée de vie est fonction de la charge appliquée selon la formule:

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

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \frac{10^6}{60N} \text{ heures}$$

N étant la vitesse de rotation en tours par minutes.

De même, pour les butées, on a défini **une charge axiale dynamique de base** ou capacité de charge axiale C_a , d'où la formule :

$$L_{10} = \left(\frac{C_a}{P_a}\right)^n \text{ millions de tours}$$

P_a est la charge axiale centrée appliquée à la butée.

L'exposant n des formules ci-dessus a pour valeurs :

Billes	Rouleaux
$n = 3$	$n = \frac{10}{3}$

Le facteur n relativement élevé exprime le fait que la durée de vie L diminue très vite suivant la charge P. Quand on double la charge sur un roulement donné $P' = 2P$, on obtient $L' = \frac{L}{8}$ pour des roulements à billes $L' = \frac{L}{10}$ pour des roulements à rouleaux.

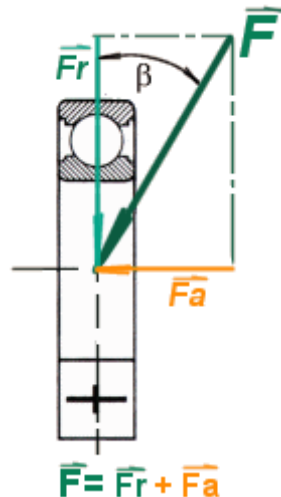
La norme ISO 281 définit le mode de calcul des charges dynamiques de base. Cette valeur est donnée dans les catalogues de roulements. Nous retiendrons seulement que la capacité de charge est fonction des caractéristiques internes du roulement (entre autres, le nombre et le diamètre de ses corps roulants).

On démontre que si on double les roulements dans un palier (deux roulements côte à côte), la capacité de charge de l'ensemble n'est pas le double de celle d'un roulement seul (elle est 1,625 fois plus grande seulement dans le cas d'un ensemble de deux roulements à billes, et de 1,715 fois plus grande dans le cas de roulements à rouleaux).

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

A.VI.2.b.iii Charge radiale équivalente P

La formule de calcul de la durée de vie L_{10} a été établie sur des roulements fonctionnant sous charge radiale uniquement et c'est la valeur de celle-ci qui entre dans la formule. Dans le cas où les roulements fonctionnent sous charges combinées de composantes radiale F_r et axiale F_a , le calcul de la durée de vie doit pouvoir prendre en compte ces deux composantes.



On définit alors une charge équivalente P , fonction des composantes radiale F_r et axiale F_r , de la charge réelle appliquée sur le roulement, qui correspond à la charge radiale qu'il faudrait appliquer sur le roulement pour que celui-ci ait la même durée L_{10} que lorsqu'il fonctionne avec le système de charge F_r et F_a .

Le calcul de la charge équivalente P est basé sur l'analyse de la répartition des contraintes dans le roulement soumis au système d'efforts F_r et F_a . Ce calcul est très complexe d'autant qu'il fait intervenir d'autres facteurs tels que le jeu et la géométrie interne du roulement.

Pour rendre le calcul de P accessible aux utilisateurs de roulements, la norme ISO 281 en donne des formules simplifiées, donc nécessairement approchées, en fonction des seules charges F_r et F_a . Ces formules ne sont applicables que dans des conditions normales de fonctionnement.

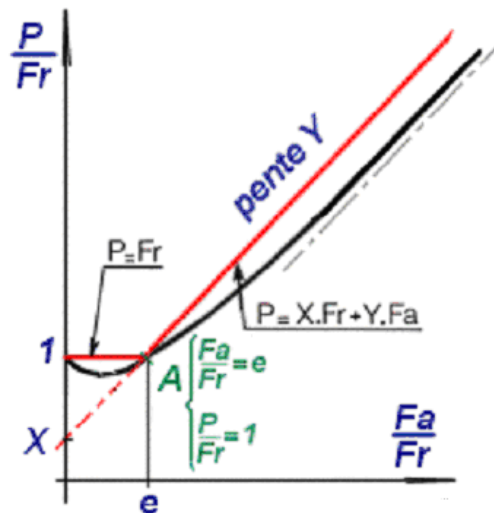
Pour les roulements à une rangée de corps roulants, la fonction

$$\frac{P}{F_r} = f\left(\frac{F_a}{F_r}\right) = 1 \text{ pour } \frac{F_a}{F_r} = 0$$

Elle décroît tout d'abord quand $\frac{F_a}{F_r}$ augmente, passe par un minimum, puis tend vers une asymptote quand l'effort axial devient prépondérant.

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

Cette diminution signifie que si l'on ajoute une composante axiale modérée à l'effort radial supporté par un roulement, sa durée de vie nominale peut être notablement augmentée, jusqu'à être doublée. Ceci s'explique par le fait qu'un plus grand nombre d'éléments sont en contact et participent à la transmission de l'effort.



Les valeurs de X , Y et e sont données dans les catalogues de roulements. Les coefficients X et Y sont donc des facteurs qui permettent de transformer les composantes des efforts extérieurs agissant sur un roulement donné en une charge équivalente purement radiale (ou purement axiale, s'il s'agit d'une butée).

X est un coefficient qui ne dépend que du type du roulement, Y est un coefficient qui varie avec l'angle de contact des corps roulants dans le roulement.

Finalement, assimile donc P aux droites rouges selon la valeur du rapport $\frac{F_a}{F_r} = e$. on a :

$\frac{F_a}{F_r} < e$	$\frac{F_a}{F_r} > e$
$P = F_r$	$P = XF_r + YF_a$

Les valeurs de X , Y et e dépendent du rapport $\frac{F_a}{C_0}$ et sont données au paragraphe « Données », quelques pages plus loin.

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

A.VI.2.b.iv *Cas particuliers*

• Durée de vie d'un ensemble de roulements

Lorsqu'un ensemble de roulements E comprend n roulements fonctionnant en même temps, la durée de vie L_{E10} de l'ensemble est fonction de la durée de vie L_{i10} de chacun des n roulements. Elle est définie par la relation suivante :

$$L_{E10} = \left[\left(\frac{1}{L_{110}} \right)^{1,5} + \dots + \left(\frac{1}{L_{i10}} \right)^{1,5} + \dots + \left(\frac{1}{L_{n10}} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}}$$

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

$$L_{E10} = \left[\left(\frac{1}{L_{110}} \right)^{1,5} + \left(\frac{1}{L_{210}} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}}$$

$$L_{E10} = \left[\left(\frac{1}{15000} \right)^{1,5} + \left(\frac{1}{23000} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}}$$

$$L_{E10} = 11630 \text{ heures}$$

Cette durée de vie est toujours inférieure à la plus petite des valeurs L_{i10} , ici, 15 000 heures.

Dernière mise à jour	Conception de guidages en rotation par éléments roulants	Denis DEFAUCHY
25/02/2016		

• Chargement variable : Charge pondérée équivalente

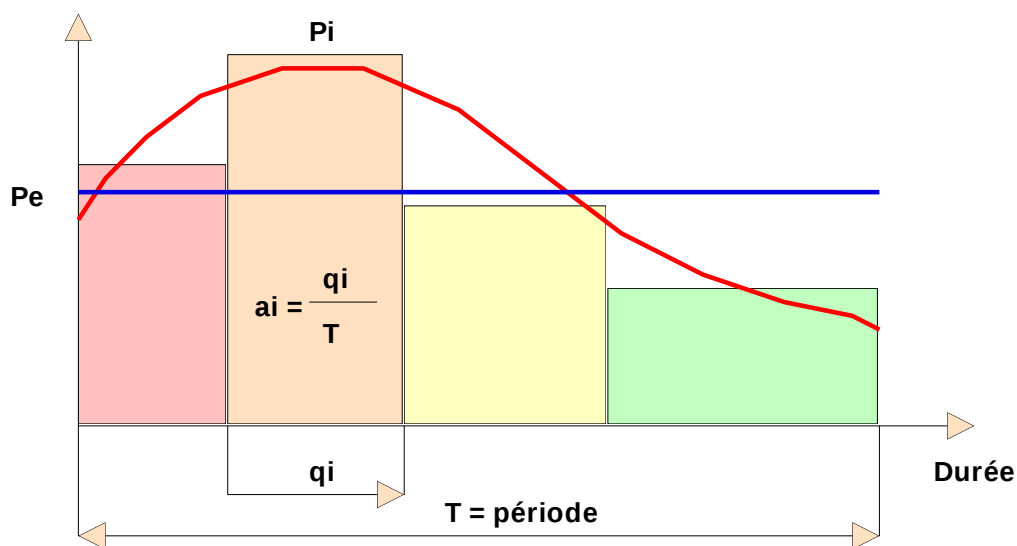
Jusqu'à présent, nous avons considéré que la charge sous laquelle fonctionnait le roulement était constante. Ce n'est pas toujours le cas.

Lorsqu'un roulement fonctionne sous charges variables, on peut, pour en calculer la durée de vie, ramener ces charges à une charge pondérée équivalente. On décompose le cycle d'utilisation du roulement en période où la charge appliquée sur le roulement peut être considérée comme constante. Pour obtenir la charge pondérée équivalente, on utilise le modèle mathématique de l'intégration, ce qui nous permet d'obtenir la formule suivante :

$$P_e = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n a_i P_i^n}$$

Avec :

- P_i la charge pendant la période i
- a_i le taux d'utilisation du roulement pendant la période d'indice i ($\sum a_i = 1$)



Cette loi traduit un cumul d'endommagement.