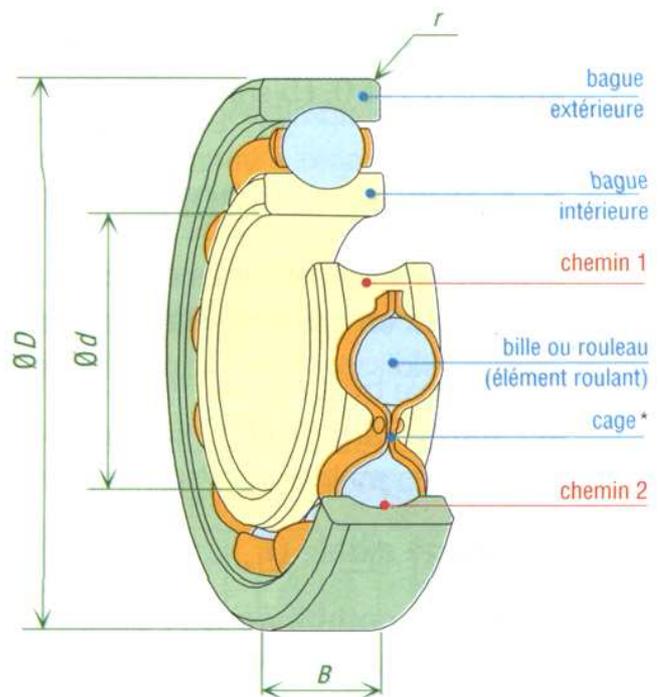


# Constitution d'un roulement

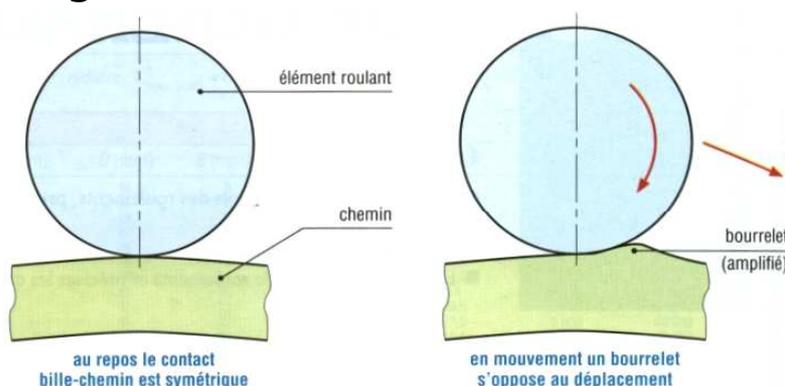
## Principaux éléments d'un roulement

- **La bague extérieure:** qui se positionne dans le logement
- **La bague intérieure:** qui se positionne sur l'arbre
- **Les éléments roulants:** billes ou rouleaux de formes diverses qui roulent sur les chemins des deux bagues
- **La cage:** qui maintient les éléments roulants à intervalles réguliers



## Phénomène de résistance au roulement

- En charge la zone de contact entre chemin et élément roulant se comprime, puis se détend après passage
- il en résulte en mouvement la formation d'un bourrelet s'opposant au mouvement
- C'est le **phénomène de résistance au roulement**
- La cage: qui maintient les éléments roulants à intervalles réguliers



## Phénomène de résistance au roulement

---

### Couple de résistance au roulement (CI)

Il permet d'évaluer la résistance générale à l'avancement (en rotation) d'un roulement.

Sa valeur approximative est :

$$C_f = f \cdot F_r \cdot R_m$$

avec  $f$  : « frottement interne » du roulement

$F_r$  : charge radiale exercée

$C_f$  : couple résistant

$R_m$  : rayon moyen =  $(d + D)/2$

## Phénomène de résistance au roulement

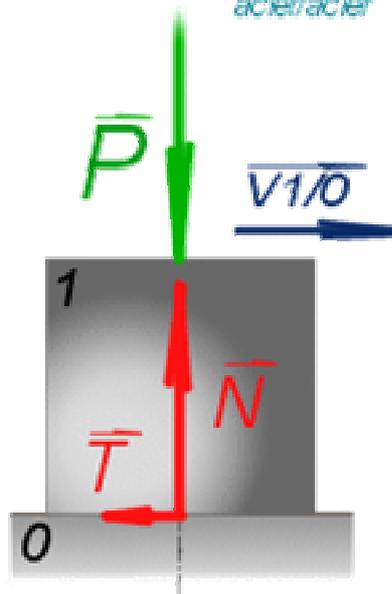
---

### Frottement

#### Frottement de glissement

$$T \leq N \cdot f \text{ avec } f = 0.2$$

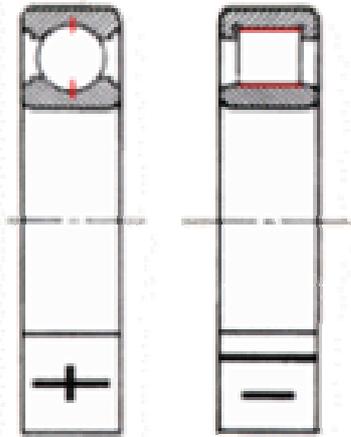
acier/acier



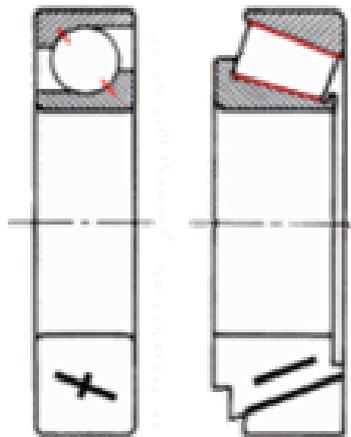
# Actions internes dans les roulements

## Contact radial ou oblique

### Contacts Radiaux



### Contacts Obliques



### Contacts axiaux



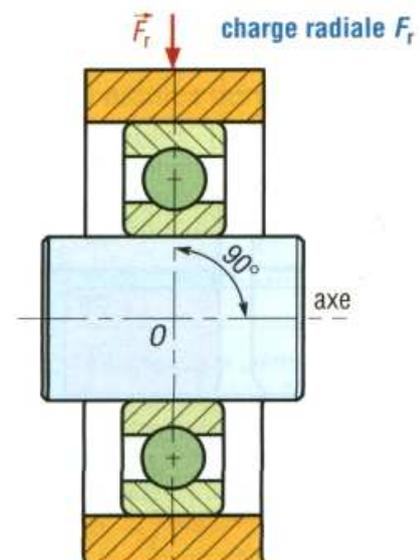
## Charges supportées par les roulements

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**.

On observe trois cas :

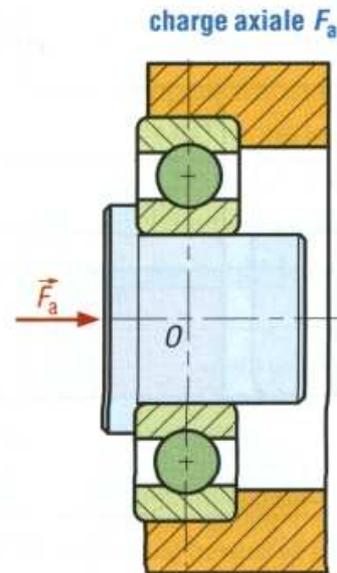
**Charge radiale ( $F_r$ )** : sa direction, **perpendiculaire à l'axe** de rotation, passe par **le centre géométrique** du roulement.

$F_r$  est toujours portée par un rayon, d'où le nom de charge radiale.



## Charges supportées par les roulements

**Charge axiale ( $F_a$ )** : sa direction est celle de l'axe de rotation du roulement.



## Charges supportées par les roulements

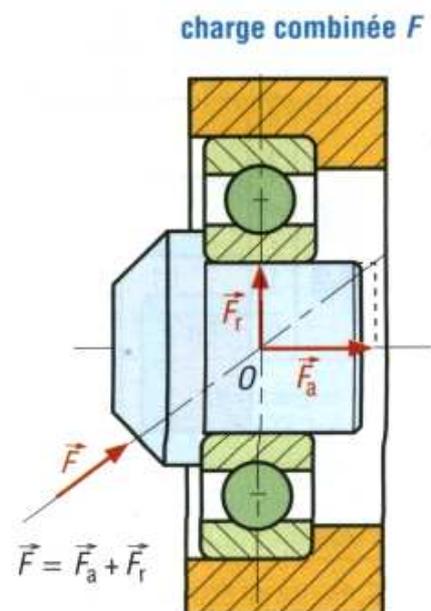
**Charge combinée ( $F$ )** : c'est la combinaison des deux cas précédents.

La direction de  $F$ , quelconque, passe par le centre géométrique du roulement.

La projection de  $F$  sur l'axe de rotation donne une composante **axiale  $F_a$** .

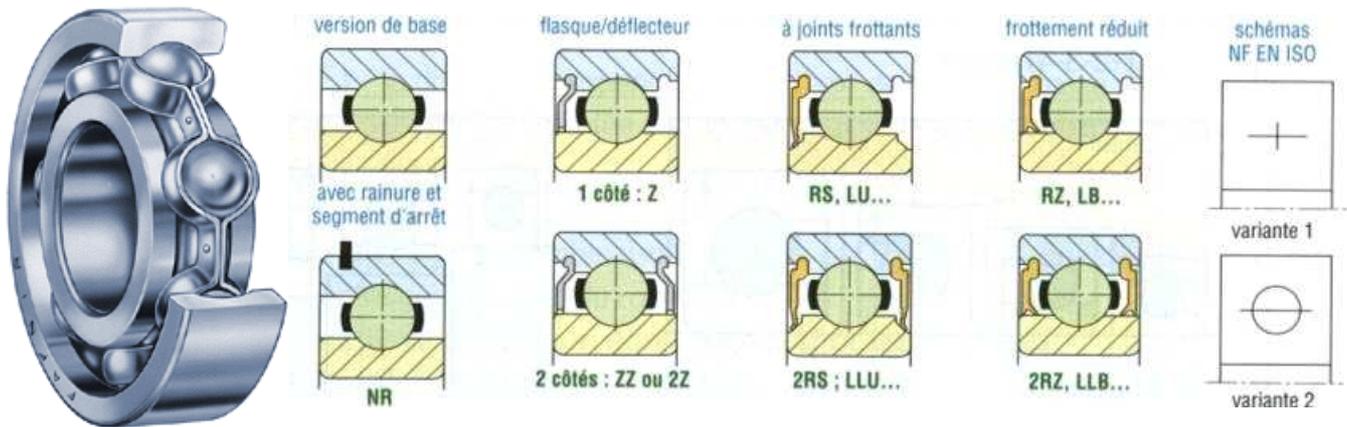
La projection de  $F$  sur un rayon perpendiculaire à l'axe donne une composante **radiale  $F_r$** .

**Remarque** :  $F_a$  et  $F_r$  sont deux **projections orthogonales** possibles de  $F$ .



## Différents types de roulements

### Roulements à billes



Principaux roulements rigides à billes (ou à gorges profondes ou contact radial). Schémas : voir aussi page 578

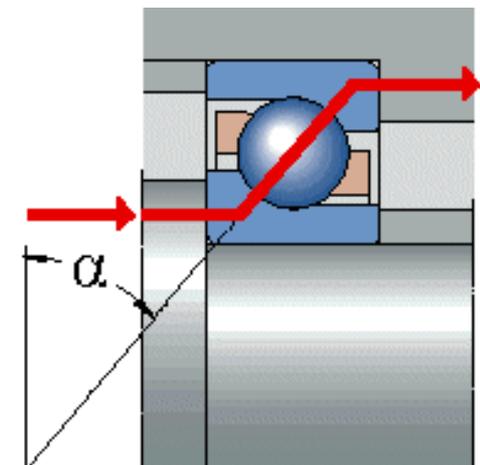


## Différents types de roulements

### Roulements à billes

#### Roulements à contact oblique :

Ils supportent tous les types de charge mais uniquement des charges axiales dans un seul sens (point d'application le centre de poussée J).



## Différents types de roulements

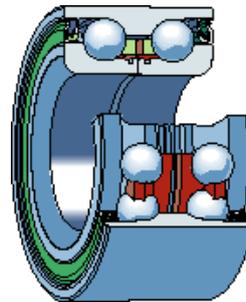
### Roulements à billes

Les bagues ne sont **pas séparables**.

Les angles  $\alpha$  de  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  et  $40^\circ$  sont les plus courants.

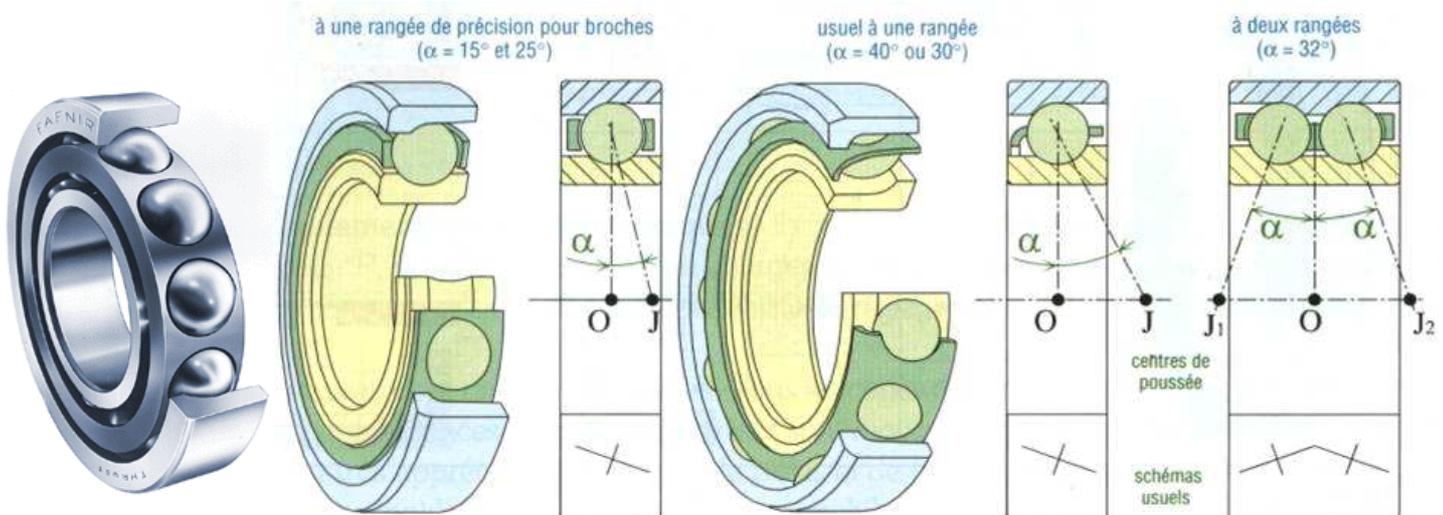
Ils doivent être montés au minimum par paire et en opposition ; ils offrent la possibilité de régler le jeu interne de la liaison par précharge du montage.

La version à deux rangées peut être utilisée seule (cas d'arbre court).



## Différents types de roulements

### Roulements à billes



Roulements à contact oblique et schématisation

## Roulements à billes

### Roulements à rotule sur billes :

Le chemin extérieur est sphérique.

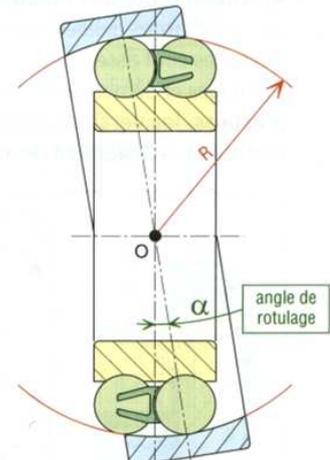
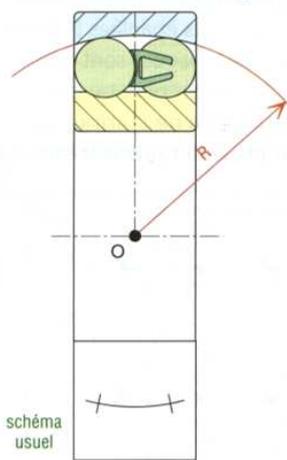
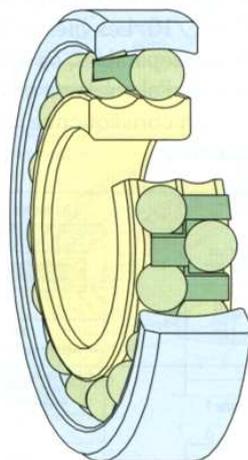
Ils supportent **tous les types de charges**, mais faiblement les charges axiales. L'angle de rotulage, assez important (entre 2,5 et 4°), **autorisent les défauts d'alignement des portées de paliers et des flexions d'arbres éle-vées**.

Les variantes à alésage conique s'utilisent avec des manchons de serrage ou de démonta-ge (pour montage sur arbre lisse avec paliers « semelle ou applique »).

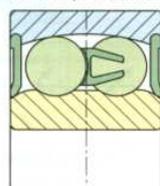
# Différents types de roulements

## Roulements à billes

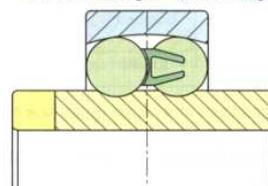
roulements à rotule de base avec deux rangées de billes



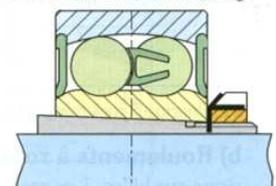
variante avec joints des 2 côtés



variante avec bague intérieure large



variante avec manchon de serrage



Roulement à rotule sur billes.

### *Roulements à billes*

#### **Butées à billes :**

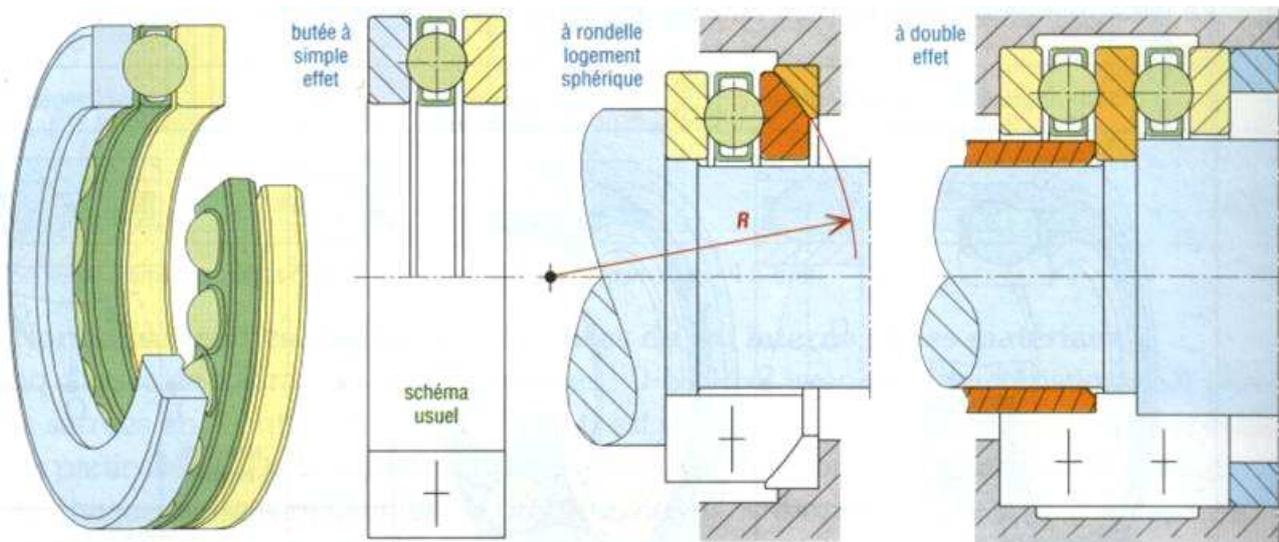
Peu utilisées, elles supportent des **charges axiales uniquement** dans un seul sens.

Les vitesses de rotation sont limitées à cause de la force centrifuge sur les billes.

Certaines versions ont des rondelles sphériques pour compenser des défauts d'alignement.

Ne réalisant aucun centrage arbre/logement, elles doivent être montées avec d'autres types de roulements.

### *Roulements à billes*



Butées à billes

## Différents types de roulements

---

### ***Roulements à rouleaux***

L'effort de contact rouleau/chemin est réparti sur une ligne (un « point » dans le cas des billes).

En conséquence, à taille identique, ils supportent des charges plus élevées que les roulements à billes (capacités de charge plus élevées).

Ils sont conseillés en cas de chocs, vibrations et surcharges possibles.

En revanche, les vitesses de rotation permises sont un peu plus faibles et ils sont plus coûteux.

## Différents types de roulements

---

### ***Roulements à rouleaux***

#### **Roulements à rouleaux cylindriques :**

Ils supportent des charges radiales importantes mais pas les charges axiales, sauf les versions épaulées NJ avec

$$***F_a = F_r/10.***$$

Les vitesses de rotation permises sont assez élevées. Les deux bagues sont dissociables ou séparables, ce qui facilite les montages et démontages.



## Différents types de roulements

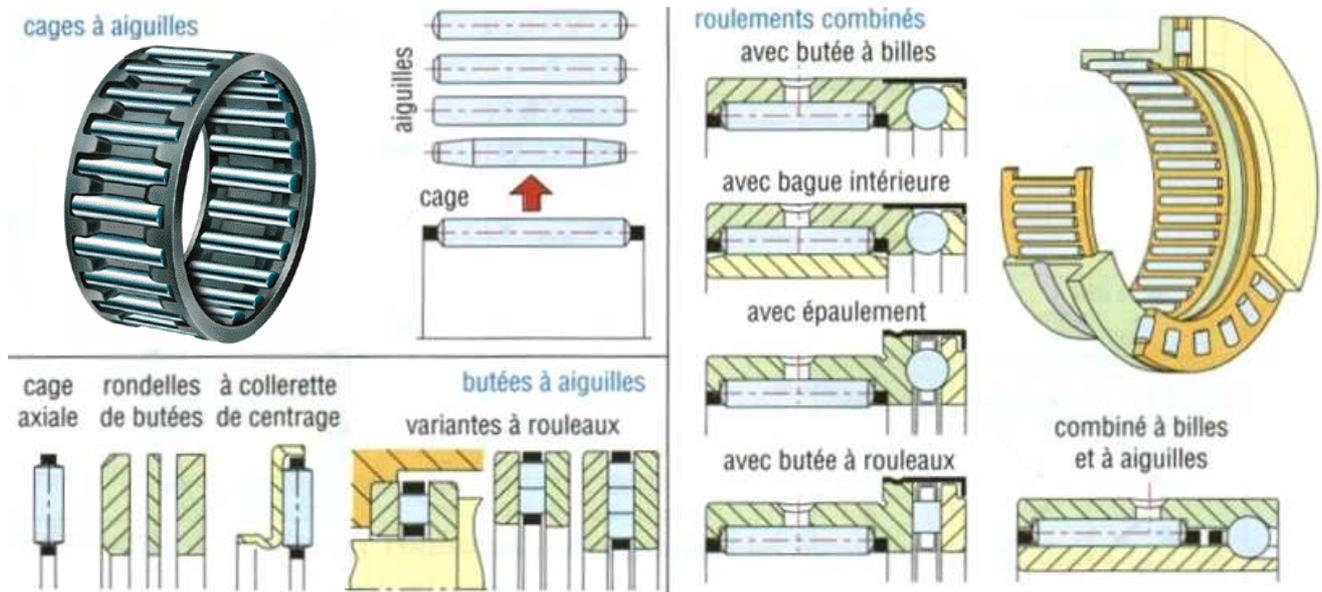
### *Roulements à rouleaux*

Ils compensent **peu, ou pas**, les **défauts d'alignement** et les flexions d'arbres, les versions à deux rangées ne compensant rien.

En conséquence, **les portées d'arbre et de logement** devront présenter une **très bonne coaxialité**

## Différents types de roulements

### *Roulements à aiguilles*



Roulements, douilles et cages à aiguilles : principales variantes

### Critères de choix

- Nature des charges : axiale, radiale ou combinée.
- Importance des charges (intensité).
- Vitesse de rotation.
- Perturbations : chocs, vibrations, niveau sonore...
- Montage et démontage : mise en place, accessibilité, réglage...
- Précision exigée : coaxialité, faux rond, précision de rotation...
- Rigidité exigée : déformations admissibles, désalignement des paliers...
- Encombrement, place disponible, dimensions des roulements.
- Longévité, durée de vie souhaitée.
- Conditions ambiantes : pollution, températures, lubrification, prix et disponibilité...

## Montage des roulements

---

### Introduction

Dans les machines évoluées, automatisées ou non, les liaisons mécaniques du type pivot, réalisées par roulements, sont parmi les plus nombreuses. Elles reviennent régulièrement dans les projets.

Le choix du type de roulement effectué, la conception d'un montage de roulements comporte **trois sortes de difficultés** :

- **Le choix des ajustements** : arbre/bague intérieure et logement/bague extérieure.
- La **fixation latérale des bagues** de roulement ou « épaulements »
- **L'étanchéité et le graissage**

### *Remarques et suggestions pour la conception*

- Faire une conception aussi **simple** que possible et utiliser un nombre total de pièces ou de composants aussi **réduit** que possible, ce qui améliore entre autre la **fiabilité**.
- Choisir les pièces auxiliaires nécessaires en priorité dans les séries normalisées : écrous à encoches, circlips, joints...
- Limiter le nombre des pièces « sur mesure » ou à fabriquer et les remplacer, chaque fois que c'est possible, par des composants normalisés.
- Veiller à la possibilité, à la facilité et à l'ordre de montage de toutes les pièces de l'ensemble. Éliminer les montages impossibles ou difficiles.

### *Choix des ajustements*

#### **Règle:**

En règle générale, chaque roulement d'un même montage a une bague ajustée serrée et l'autre ajustée avec jeu.

Le jeu simplifie les assemblages, compense les dilatations et évite les oppositions mutuelles entre les roulements.

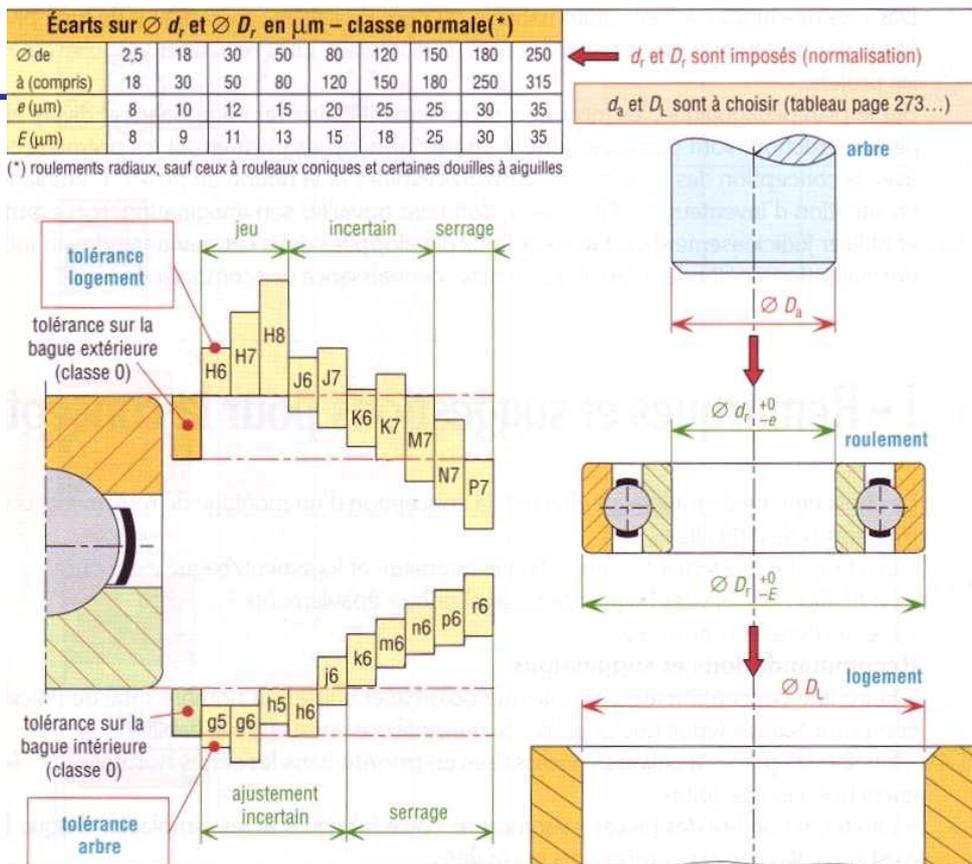
**Règle :** si une bague tourne par rapport à la direction de la charge exercée sur le roulement ( $F_a, F_r$  ou  $F$ ), elle doit être ajustée avec serrage.

Si elle est fixe, ou non tournante, par rapport à la direction de cette charge, elle doit être ajustée avec jeu.

### Remarques :

- La charge est fixe par rapport à une bague lorsqu'elle agit toujours au même point pendant une révolution. Elle est tournante si, pendant une révolution, toute la circonférence de la bague reçoit la charge. Si la direction d'une charge forte n'est pas constante, elle sera assimilée à une charge tournante.

- Si une bague devant être montée serrée ne l'est pas, elle risque de subir un phénomène de détérioration par roulage. La bague est laminée entre les éléments roulants et l'arbre ou le logement.



Ajustements, diamètres à choisir par le concepteur d'un montage.  
 Classe normale = classe 0 = classe 6X = ABEC-1...

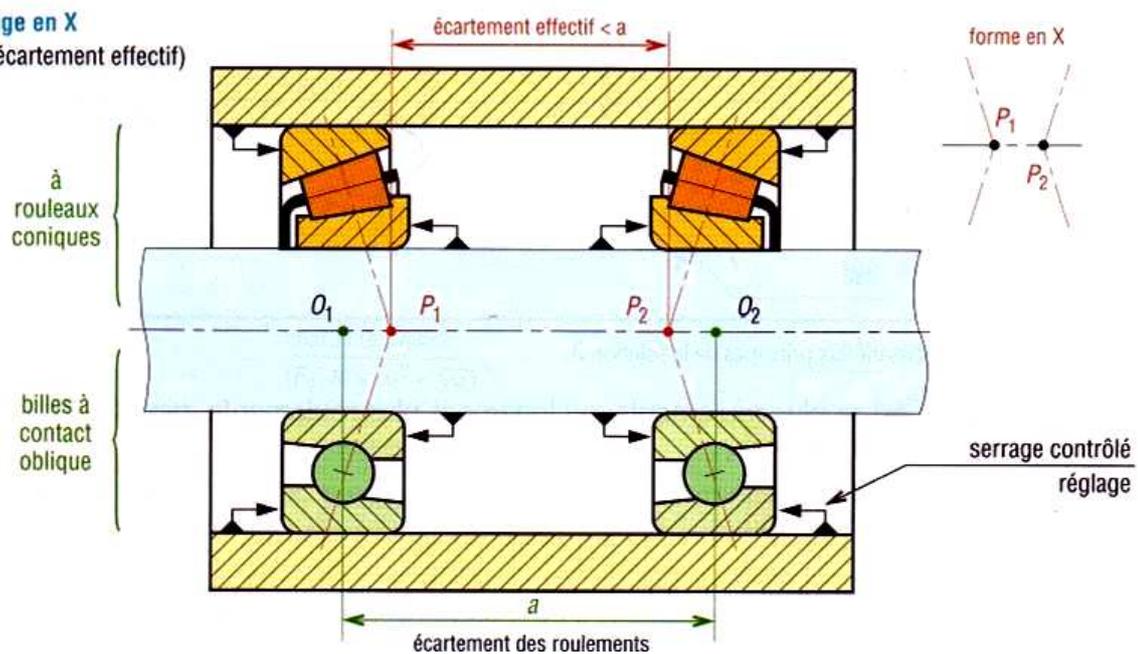
Ajustements usuels des roulements (fabricants)												
particularités de la charge	roulements à billes (tous)		roulements à rotule sur rouleaux				roulements à rouleaux coniques			roulements à aiguilles sans bague intérieure		
			$d \leq 40$	$40 < d \leq 100$	$100 < d \leq 140$	$140 < d \leq 400$	$d \leq 120$	$120 < d \leq 180$	$180 < d \leq 400$			
			roulements à rlx cylindr. + aiguilles avec b.i.									
tolérance des arbres	charge tournante par rapport à la bague intérieure	faible $\frac{C}{P} > 10$	j6	k6	j6	k6	m6		m6	n6	n6	h5 (h6) si $d \leq 80$
		normale $5 < \frac{C}{P} \leq 10$	k6 (k5)	m6 (m5)	k6 (k5)	m6 (m5)	n6	p6	m6	n6	p6	
		forte $\frac{C}{P} \leq 5$	k6	m6	-	n6	p6	r6	n6	p6	r6	
	charge fixe par rapport à la bague intérieure	g6 (BC) h6 (BNC)	g6 (BC) h6 (bague intérieure non coulissante)				g6 (BC) h6 (BNC)			g5		
tolérance des logements	charge tournante par rapport à la bague extérieure	faible $\frac{C}{P} > 10$	M7	M7				P7 ou R7 (forte charge)			M7	N7 douilles
		normale $5 < \frac{C}{P} \leq 10$	N7	N7							N7	
		forte $\frac{C}{P} \leq 5$	P7	P7							P7	
	charge fixe par rapport à la bague extérieure	H7 (BC) K6 (PR) G7 (EA)	H7 (bague coulissante) K6 (PR) G7 (EA)				bague ext. réglable J7	bague ext. non réglable P7 (R7)	H7 (bague coulissante) ou J7			

**BNC** : bague non coulissante ; **BC** : bague coulissante ; **PR** : précision de rotation ; **EA** : si échauffement de l'arbre.

## Montage des roulements

### Fixation latérale des bagues de roulements

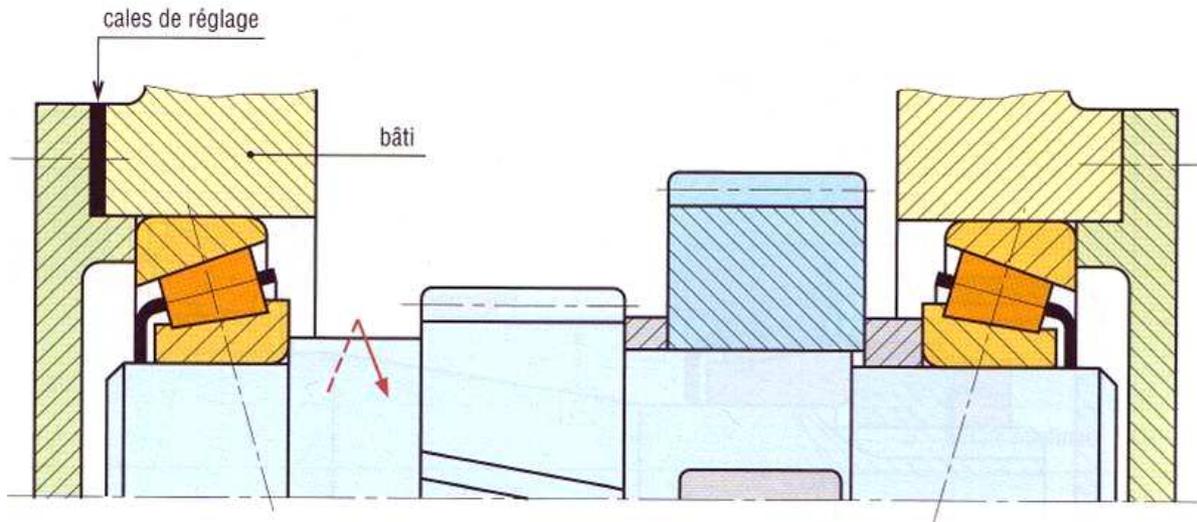
montage en X  
(petit écartement effectif)



## Montage des roulements

### *Fixation latérale des bagues de roulements*

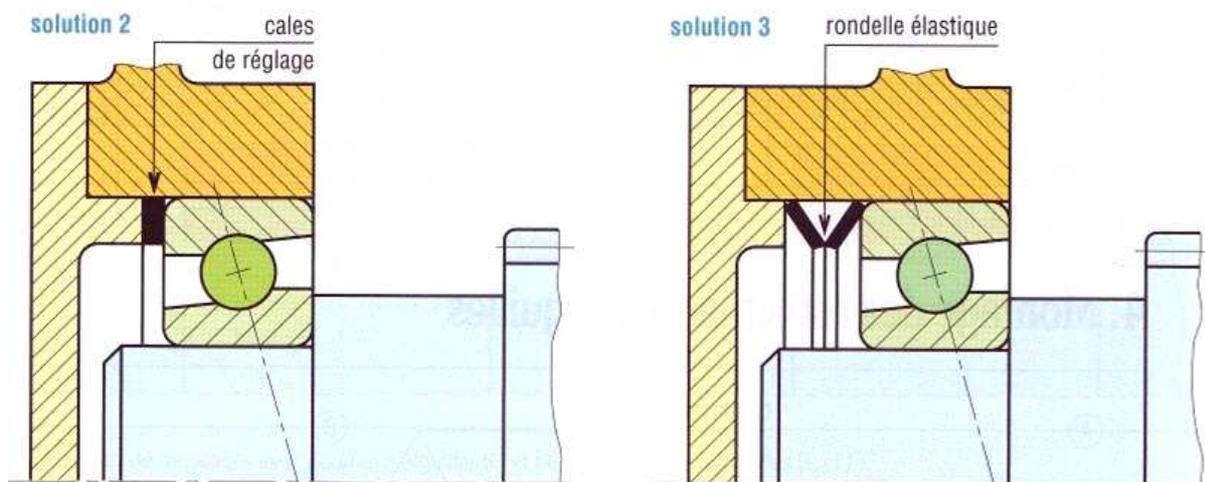
#### Montage en X ou montage direct



## Montage des roulements

### *Fixation latérale des bagues de roulements*

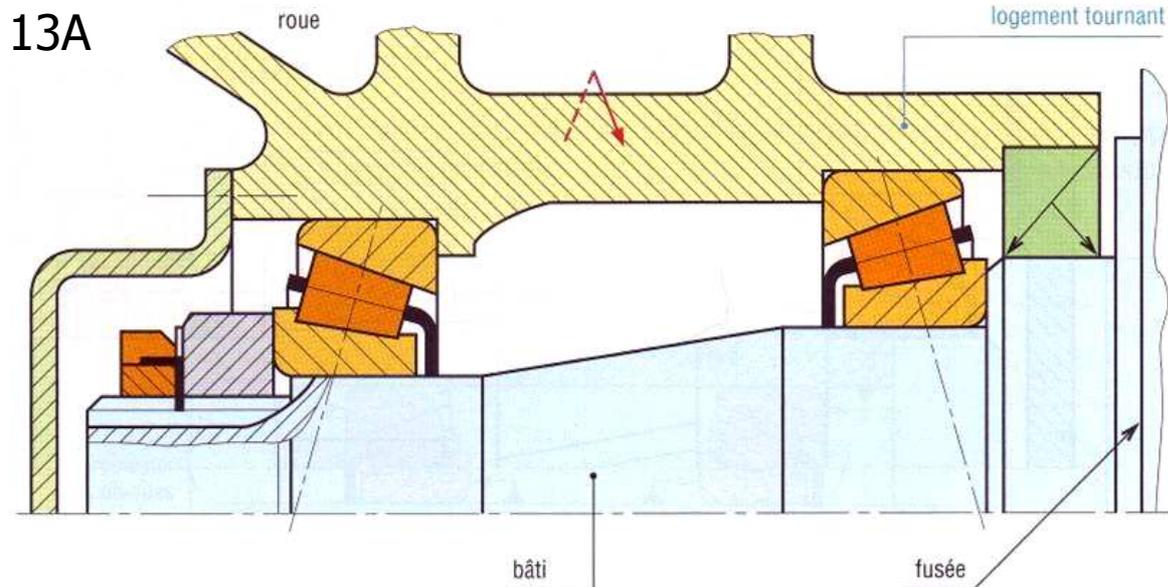
#### Montage en X ou montage direct



## Montage des roulements

### *Fixation latérale des bagues de roulements*

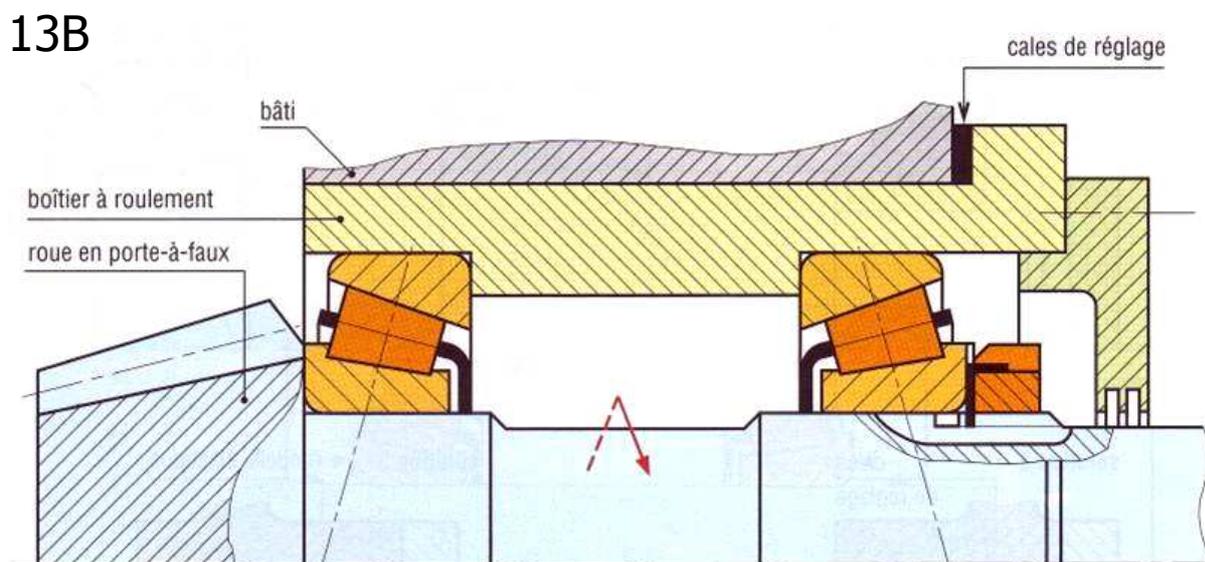
#### Exemple de montage en O



## Montage des roulements

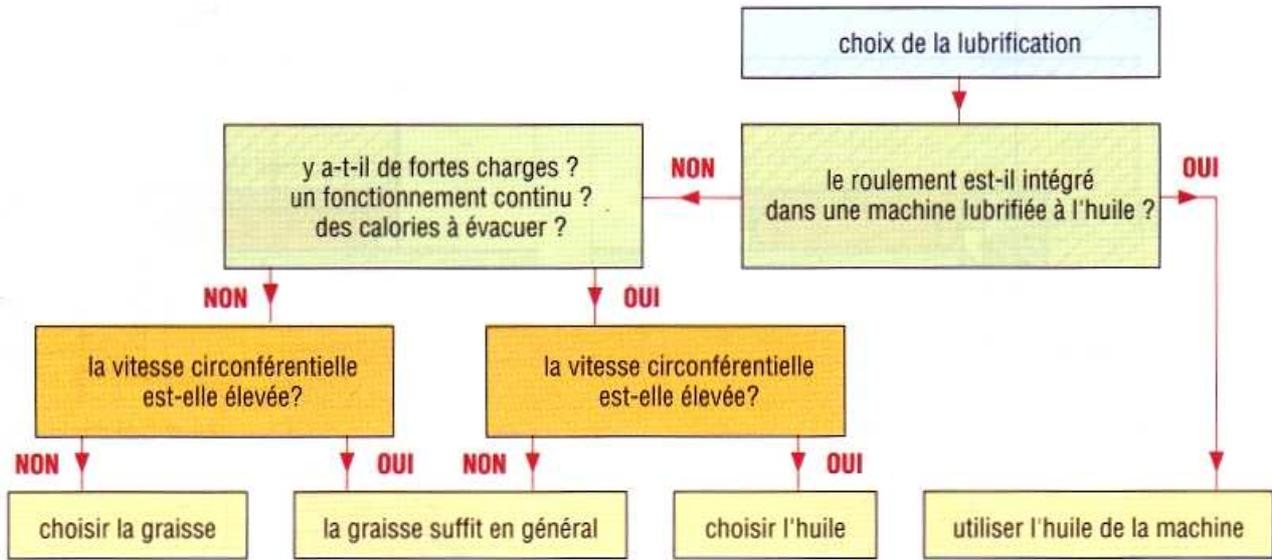
### *Fixation latérale des bagues de roulements*

#### Exemple de montage en O



# Lubrification des roulements

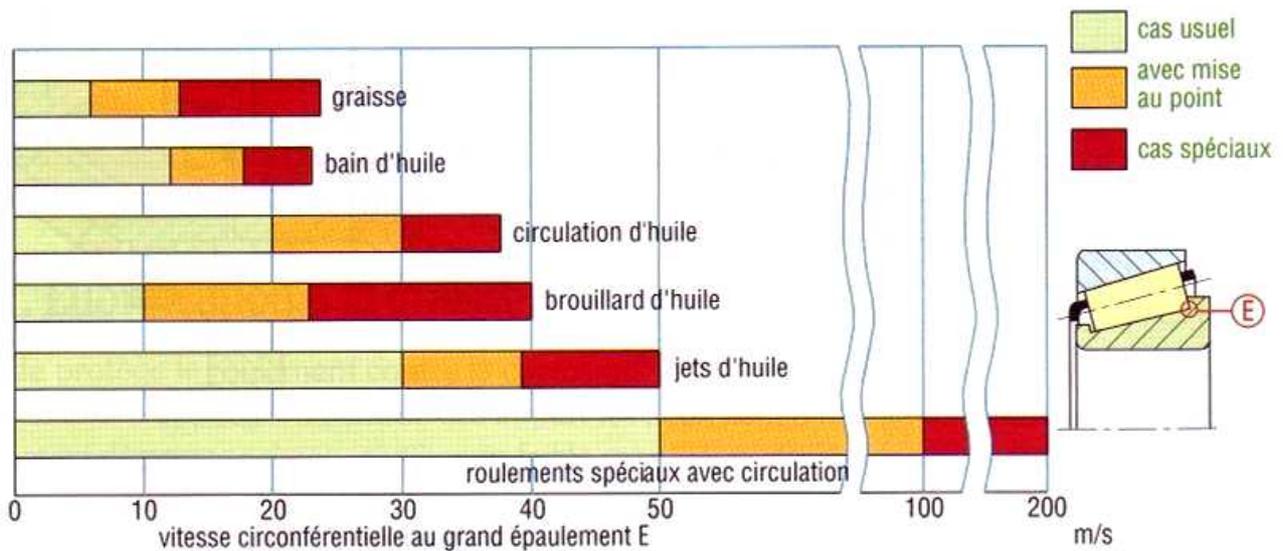
## Introduction



Organigramme pour le choix du mode de lubrification

# Lubrification des roulements

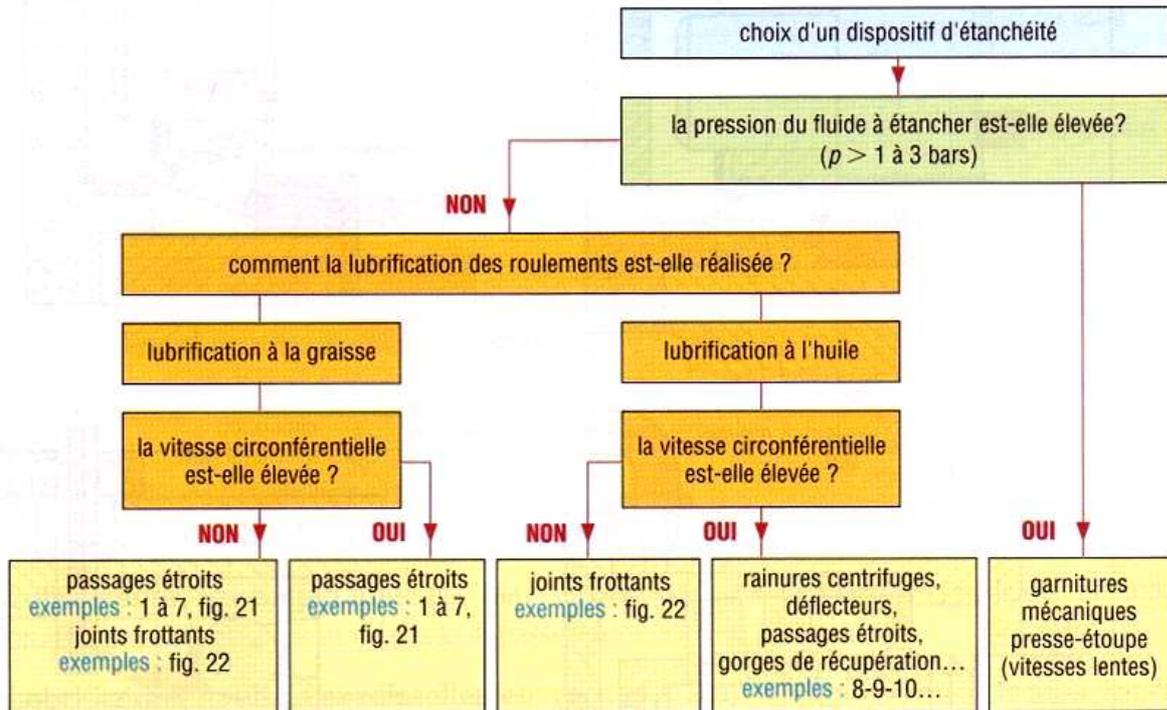
## Lubrification à l'huile



. Roulements à rouleaux coniques : vitesses possibles selon le mode de lubrification.

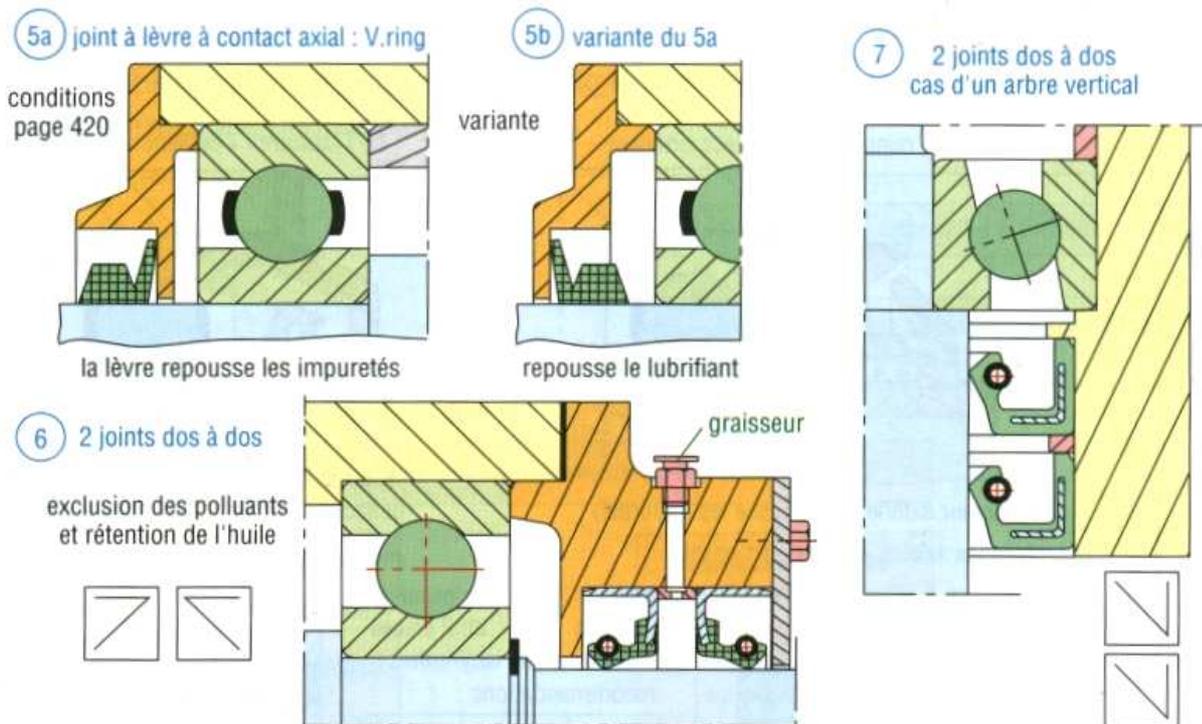
# Etanchéité des roulements

## Introduction



Organigramme pour le choix d'un dispositif d'étanchéité

# Etanchéité des roulements



Dispositifs avec frottement

- Dans 70% des cas, il s'agit d'une mauvaise lubrification : trop ou trop peu; lubrifiant inadapté, etc...
- Dans 18%, d'une pollution : entrée de liquide ou de particules solides, d'où l'importance des joints d'étanchéité dont la défaillance peut provoquer une fuite de graisse et une entrée de pollution.
- Dans 10%, d'un montage incorrect : montage brutal, échauffement excessif, mauvais ajustement et jeux, serrage excessif du manchon conique, défauts géométriques...
- Et dans 2%, de diverses causes : utilisation sous des charges mal adaptées, défauts de réglage, corrosion liée au contact, passage de courant électrique...

### Définition de l'écaillage

Cette "mort naturelle " se concrétise par l'apparition d'écaillages de fatigue.

Même utilisé correctement (notamment avec une bonne lubrification), des fissures vont se créer et se développer jusqu'à ce que des morceaux de matière se détachent.

C'est le signe de la destruction progressive du roulement jusqu'à sa "mort" annoncée.

On parle alors d'écaillage. Le chemin de roulement est endommagé. Le roulement perd ses propriétés initiales, il n'est donc plus en mesure de fonctionner normalement.

### *Evolution de l'écaillage*



Les contraintes auxquelles sont soumises les pistes de roulement conduisent à plus ou moins long terme à une fissure au sein de l'acier : des inclusions en sous-couche puis une fissure.

## Calcul des roulements

---

### *Fiabilité et durée de vie $L_{10}$*

#### **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.**

#### **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. Llo sert de référence à tous les roulements de la série.

## Calcul des roulements

### *Fiabilité et durée de vie $L_{10}$*

### **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:

$$L_n = a_1 \cdot L_{10}$$

avec:  $a_1 = 4,48 [\ln(100/F)]^{2/3}$   
F = fiabilité en %.

## Calcul des roulements

### *Fiabilité et durée de vie $L_{10}$*

Fiabilités différentes de 90 %						$L_n = a_1 L_{10}$		
fiabilité F en %	90	95	96	97	98	99	99,5	99,9
$L_n$	$L_{70}$	$L_5$	$L_4$	$L_3$	$L_2$	$L_1$	$L_{0,5}$	$L_{0,1}$
$a_1$	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21	0,15	0,06

## Calcul des roulements

### *Fiabilité et durée de vie $L_{10}$*

#### 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  $15.L_{10}$  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.

## Calcul des roulements

### *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.

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

L'équation précédente donne  $F = 0,9637$  (fiabilité de 96,37 %)

Pourcentage de défaillance :  $D = 1 - F = 0,0363$  (3,63 %).

## Calcul des roulements

### *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 :

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

## Calcul des roulements

### *Durée de vie d'un ensemble ou d'une association de roulements*

**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

### **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

### **Capacité de charge dynamique C**

#### **Définition :**

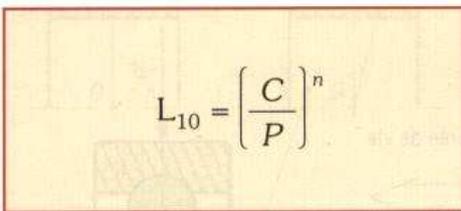
La charge dynamique de base C, d'une série de roulements identiques, est **la charge radiale** (axiale pour une butée), **constante en intensité et en direction**, que peut endurer **90 % des roulements du groupe**, pendant **1 million de tours**, avant qu'apparaissent les **premiers signes de fatigue**.

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.

### Relation entre durée de vie $L_{10}$ et charge dynamique C


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

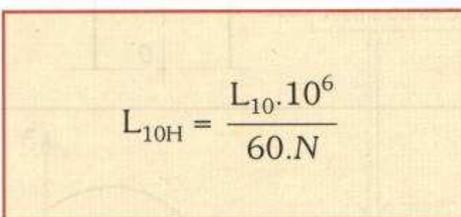
$L_{10}$  : durée de vie du roulement en millions de tours

C : charge dynamique de base

P : charge équivalente exercée sur le roulement

$n = 3$  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.

## Calcul des roulements

### *Relation entre durée de vie $L_{10}$ et charge dynamique $C$*

Durées de vie indicatives de quelques paliers à roulements		
mode d'emploi	exemples d'emploi	durée de vie $L_{10H}$
usages intermittents	<ul style="list-style-type: none"><li>•électroménager, outillages</li><li>•électroportatifs, automobiles,</li><li>•appareils de manutention et de levage, moteurs d'avions...</li></ul>	1 000 à 15 000
fonctionnant 8 heures par jour	<ul style="list-style-type: none"><li>•véhicules industriels,</li><li>•machines-outils, machines agricoles, machines de production, réducteurs...</li></ul>	15 000 à 35 000
service en continu 24 heures 24	<ul style="list-style-type: none"><li>•convoyeurs, compresseurs, laminoirs, certaines machines de production, ventilateurs, moteurs stationnaires</li></ul>	35 000 à 60 000
machines dont la fiabilité est très importante	<ul style="list-style-type: none"><li>•machines à papier, machines textiles, navires, services des eaux, barrages, fours rotatifs, propulseurs...</li></ul>	60 000 à 100 000

## Calcul des roulements

### *Exemple de calcul*

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.

$$L_{10} = \left[ \frac{C}{P} \right]^n = \left[ \frac{6300}{2100} \right]^3 = 3^3 = 27 \text{ (27 millions de tours)}$$

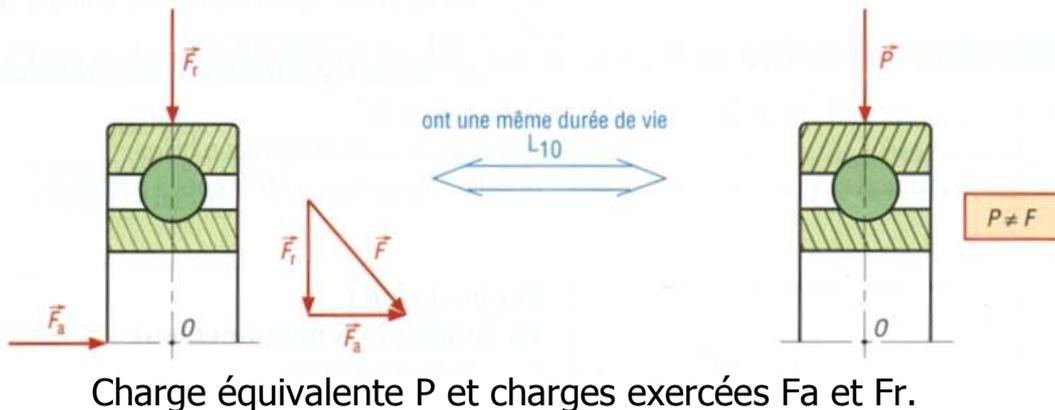
$$L_{10H} = \frac{27 \times 10^6}{60 \times 150} = 3\,000 \text{ heures}$$

## Calcul des roulements

### Calcul de la charge 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  $F$ .



## Calcul des roulements

### Calcul de la charge équivalente $P$

#### 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

#### Remarques

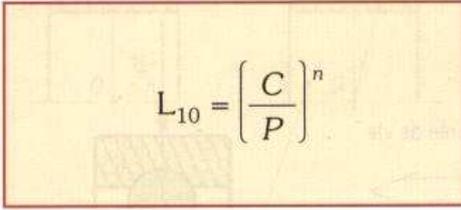
- Si la bague extérieure tourne par rapport à la direction de la charge la valeur de  $P$  est calculée par

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

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

## Calcul des roulements

### **Relation entre durée de vie $L_{10}$ et charge dynamique $C$**


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

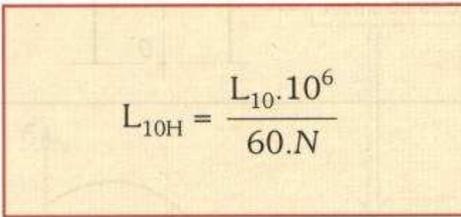
$L_{10}$  : durée de vie du roulement en millions de tours

$C$  : charge dynamique de base

$P$  : charge équivalente exercée sur le roulement

$n = 3$  pour les roulements à billes

$n = 10/3$  pour les roulements à rouleaux


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

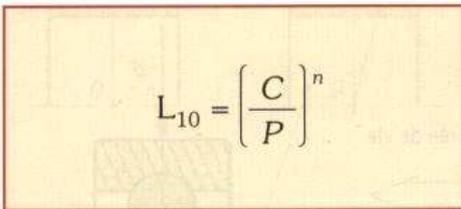
**Durée de vie  $L_{10H}$  en heures de fonctionnement**

$L_{10}$  : millions de tours

$N$  : vitesse de rotation en tr/min.

## Calcul des roulements

### **Relation entre durée de vie $L_{10}$ et charge dynamique $C$**


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

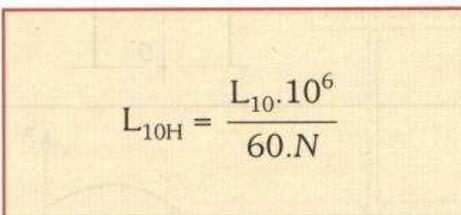
$L_{10}$  : durée de vie du roulement en millions de tours

$C$  : charge dynamique de base

$P$  : charge équivalente exercée sur le roulement

$n = 3$  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.

## Calcul des roulements

### *Relation entre durée de vie $L_{10}$ et charge dynamique $C$*

Durées de vie indicatives de quelques paliers à roulements		
mode d'emploi	exemples d'emploi	durée de vie $L_{10H}$
usages intermittents	<ul style="list-style-type: none"><li>•électroménager, outillages</li><li>•électroportatifs, automobiles,</li><li>•appareils de manutention et de levage, moteurs d'avions...</li></ul>	1 000 à 15 000
fonctionnant 8 heures par jour	<ul style="list-style-type: none"><li>•véhicules industriels,</li><li>•machines-outils, machines agricoles, machines de production, réducteurs...</li></ul>	15 000 à 35 000
service en continu 24 heures 24	<ul style="list-style-type: none"><li>•convoyeurs, compresseurs, laminoirs, certaines machines de production, ventilateurs, moteurs stationnaires</li></ul>	35 000 à 60 000
machines dont la fiabilité est très importante	<ul style="list-style-type: none"><li>•machines à papier, machines textiles, navires, services des eaux, barrages, fours rotatifs, propulseurs...</li></ul>	60 000 à 100 000

## Calcul des roulements

### *Exemple de calcul*

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.

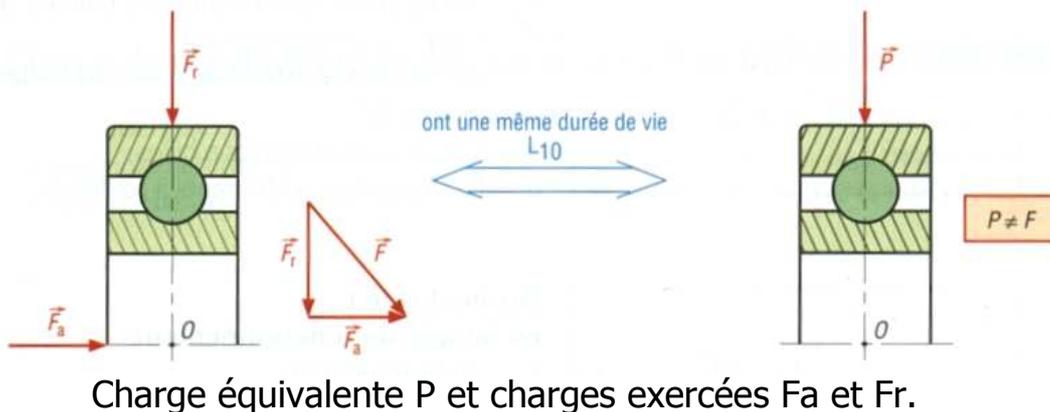
Déterminons les durées  $L_{10}$  et  $L_{10H}$  si la vitesse de rotation de l'arbre est de 150 tr/min.

## Calcul des roulements

### Calcul de la charge 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  $F$ .



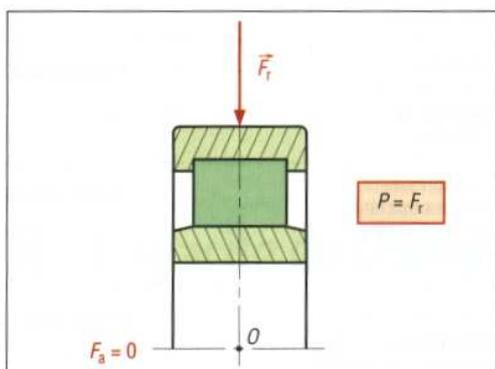
## Calcul des roulements

### Calcul de la charge équivalente $P$

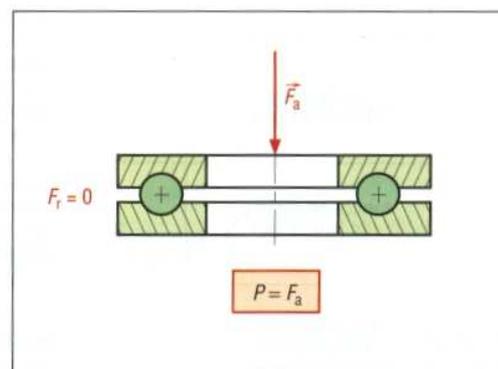
#### Cas particuliers

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  $P = F_a$ .



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



Valeur de  $P$  dans le cas des butées.

## Calcul de la charge équivalente $P$

### Cas général d'une charge combinée

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

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

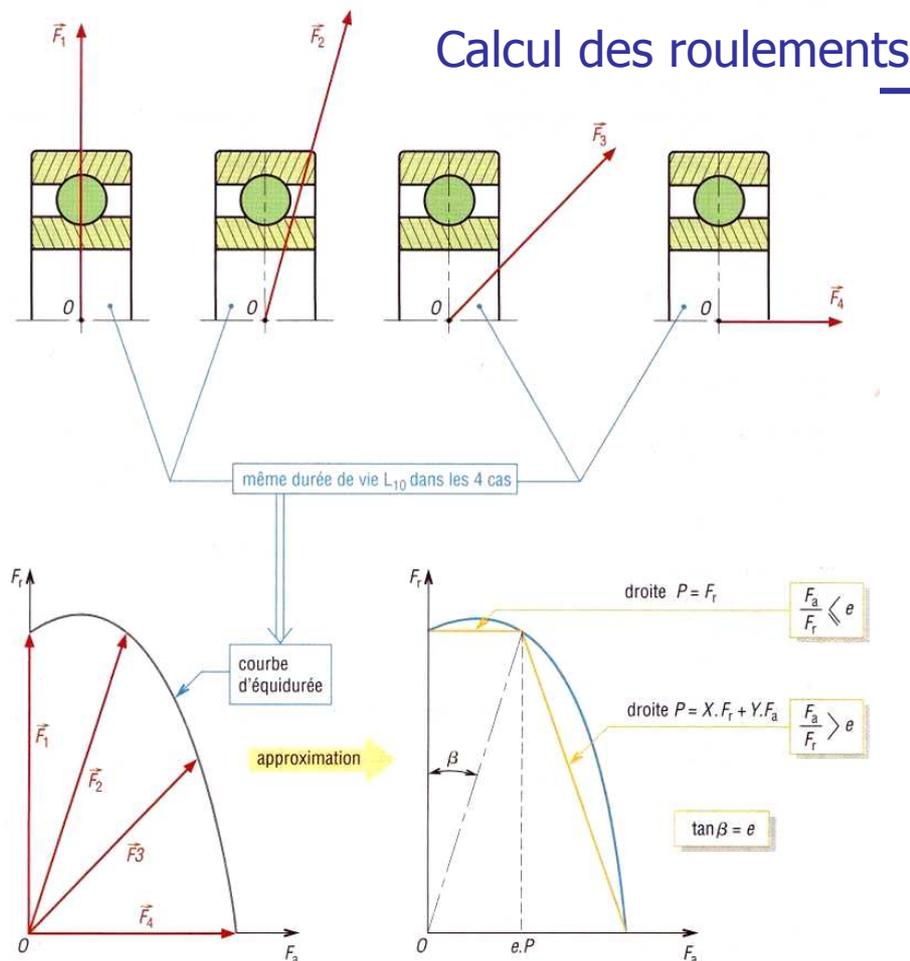
$X$  et  $Y$  sont des coefficients normalisés liés à la nature du roulement et à ses dimensions

### Remarques

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

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

- Les relations précédentes sont obtenues à partir des courbes expérimentales 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  $X, Y, e = \tan \beta$  ...).

# Calcul des roulements

## Calcul de la charge équivalente P

**Valeurs des coefficients X et Y suivant types de roulement**

**roulements rigides à billes (à contact radial)**

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

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

la valeur de  $e$  et  $Y$  dépendent du rapport  $\frac{f_0.F_a}{C_0}$  ou  $\frac{F_a}{C_0}$  (voir ci-dessous)

$\frac{f_0.F_a^*}{C_0}$	0,172	0,345	0,689	1,03	1,38	2,07	3,45	5,17	6,89
$\frac{F_a^{**}}{C_0}$	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
$Y^*$	2,30	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

\* : valeurs NF ISO 281 ; \*\* : valeurs usuelles

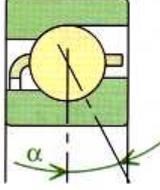
# Calcul des roulements

## Calcul de la charge équivalente P

roulements à rotules sur billes	roulements à rotules sur rouleaux
<p>si <math>\frac{F_a}{F_r} \leq e</math> alors <math>P = F_r + Y_1.F_a</math></p> <p>si <math>\frac{F_a}{F_r} &gt; e</math> alors <math>P = 0,65.F_r + Y_2.F_a</math></p> <p>avec <math>\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,42.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,65.\cotan(\alpha) \end{cases}</math></p> <p>les valeurs de <math>e</math>, <math>Y_1</math> et <math>Y_2</math> sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec <math>d</math>, <math>D</math>, <math>b</math> et <math>r</math>.</p>	<p>si <math>\frac{F_a}{F_r} \leq e</math> alors <math>P = F_r + Y_1.F_a</math></p> <p>si <math>\frac{F_a}{F_r} &gt; e</math> alors <math>P = 0,67.F_r + Y_2.F_a</math></p> <p>avec <math>\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,45.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,67.\cotan(\alpha) \end{cases}</math></p> <p>les valeurs de <math>e</math>, <math>Y_1</math> et <math>Y_2</math> sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec <math>d</math>, <math>D</math>, <math>b</math> et <math>r</math>.</p>
roulements à rouleaux coniques	
<p>si <math>\frac{F_a}{F_r} \leq e</math> alors <math>P = F_r</math></p> <p>si <math>\frac{F_a}{F_r} &gt; e</math> alors <math>P = 0,4.F_r + Y.F_a</math></p> <p>avec <math>\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y = 0,4.\cotan(\alpha) \end{cases}</math></p> <p>les valeurs de <math>e</math>, <math>Y</math> sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec <math>d</math>, <math>D</math>, <math>b</math> et <math>r</math>.</p>	<p style="text-align: center;">roulements à deux rangées</p> <p>si <math>\frac{F_a}{F_r} \leq e</math> : <math>P = F_r + Y_1.F_a</math></p> <p>si <math>\frac{F_a}{F_r} &gt; e</math> : <math>P = 0,67.F_r + Y_2.F_a</math></p> <p>avec <math>\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,45.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,67.\cotan(\alpha) \end{cases}</math></p> <p>mêmes valeurs que rotules sur rlx</p>

## Calcul des roulements

### Calcul de la charge équivalente $P$

roulements à billes à contact oblique									
		roulements à une rangée et roulements en tandem (duplex T)				roulements à deux rangées et duplex en X et en 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 $\frac{F_a}{F_r} > e$	
$\alpha$ degrés	$e$	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

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

## Calcul des roulements

### Capacité de la 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 (conformément à l'ISO 76).

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

## Calcul des roulements

### Capacité de la charge statique $C_0$ et charge statique équivalente $P_0$

Comme  $C_0$ ,  $P_0$  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  $P_0 \cdot s_0 \leq C_0$

## Calcul des roulements

### Capacité de la charge statique $C_0$ et charge statique équivalente $P_0$

So	rlts à faibles vitesses		rlts à l'arrêt	
fonctionnement	rlts à billes	rlts à rouleaux	rlts à billes	rlts à rouleaux
régulier sans vibrations (si silencieux)	0,5 à 1 (2)	1 à 1,5 (3)	0,4	0,8
normal (si silencieux)	0,5 à 1 (2)	1 à 1,5 (3,5)	0,5	1
chocs prononcés (si silencieux)	$\geq 1,5$ ( $\geq 2$ )	$\geq 3$ ( $\geq 4$ )	$\geq 1$	$\geq 2$

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

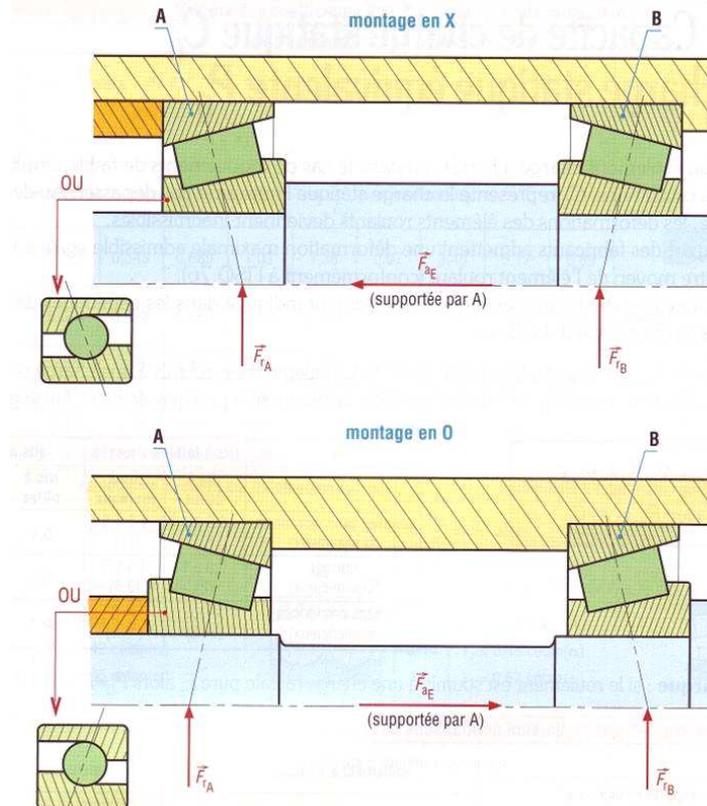
## Calcul des roulements

### Capacité de la charge statique $C_o$ et charge statique équivalente $P_o$

Valeurs normalisées des coefficients $X_o$ et $Y_o$ (NF ISO 76)						
Type de roulements		roulement à 1 rangée		roulement à 2 rangées		
		$X_o$	$Y_o$	$X_o$	$Y_o$	
<b>Roulements à Billes</b>	à contact radial		0,6	0,5	0,6	0,5
	à rotules		0,5	$0,22 \cdot \cotan \alpha$	<b>1</b>	$0,44 \cdot \cotan \alpha$
	Contact oblique	$\alpha = 15^\circ$	0,5	0,46	1	0,92
		$\alpha = 25^\circ$	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		
<b>Roulements à rouleaux</b>	à rouleaux coniques		0,5	$0,22 \cdot \cotan \alpha$	<b>1</b>	$0,44 \cdot \cotan \alpha$
	à rotules		0,5	$0,22 \cdot \cotan \alpha$	<b>1</b>	$0,44 \cdot \cotan \alpha$

## Calcul des roulements

### Capacité de la charge statique $C_o$ et charge statique équivalente $P_o$



## Calcul des roulements

### Capacité de la charge statique $C_0$ et charge statique équivalente $P_0$

Méthode de calcul ISO		
	cas 1	cas 2
condition à vérifier	$\frac{0,5 F_{rA}}{Y_A} \ll F_{aE} + \left[ \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B} \right]$	$\frac{0,5 F_{rA}}{Y_A} > F_{aE} + \left[ \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B} \right]$
charges axiales totales	$F_{aA} = F_{aE} + \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B}$ $F_{aB} = \frac{0,5 F_{rB}}{Y_B}$	$F_{aA} = \frac{0,5 F_{rA}}{Y_A}$ $F_{aB} = \frac{0,5 F_{rA}}{Y_A} - F_{aE}$
charges équivalentes $P_A$ et $P_B$	$P_B = F_{rB}$ si $\frac{F_{aA}}{F_{rA}} > e_A$ alors $P_A = 0,4 F_{rA} + Y_A \cdot F_{aA}$ si $\frac{F_{aA}}{F_{rA}} \ll e_A$ alors $P_A = F_{rA}$	$P_A = F_{rA}$ si $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} > e_B$ alors $P_B = 0,4 F_{rB} + Y_B \cdot F_{aB}$ si $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} \ll e_B$ alors $P_B = F_{rB}$

Méthode de calcul ISO. Pour appliquer la méthode, appeler A le roulement supportant  $F_{aE}$ .

## Calcul des roulements

### Calculs des roulements

**Données nécessaires :**  $F_a$ ,  $F_r$  et  $N$ , la vitesse de rotation. La durée de vie  $L_{10}$  dépend de ces paramètres.

**Autres paramètres usuels :** diamètre minimal  $d_{mini}$  de l'arbre, fourni par la résistance des matériaux, et  $D_{maxi}$ , qui résulte de l'encombrement général et de la place disponible.

Faire le choix d'un type de roulement ou du moins en limiter le nombre.

#### **1. Calculs de vérification**

Ils sont destinés à vérifier la durée de vie d'un roulement dont les dimensions ( $d, D, B, C, C_o, e, Y...$ ) sont connues.

#### **2. Calculs de détermination**

L'objectif est de choisir un roulement et ses dimensions connaissant une durée de vie souhaitée. Il est nécessaire de procéder par itération (calculs de vérification successifs à partir de roulements judicieusement choisis) avant d'envisager un choix définitif.

Il existe de nombreux logiciels d'assistance permettant d'effectuer rapidement ce type de calcul.

#### **3. Cas des roulements à contact oblique et à rouleaux coniques**

Pour ces roulements, le calcul de la charge axiale  $F_a$  présente une différence du fait de la géométrie particulière des bagues.

Pour chaque roulement, l'action de la charge radiale  $F_r$  entraîne par « effet de cône », la création d'une charge axiale induite ( $F_{a,}$ ) s'ajoutant ou se retranchant à celle déjà exercée par l'arbre ( $F_a$ ).

Dans la méthode de calcul normalisé ISO,  
 $F_{ai} = 0,5 \cdot F_r / Y$ .

Cette méthode permet de calculer les charges axiales totales  $F_{aA}$  et  $F_{aB}$  résultant de  $F_{aE}$  et des charges axiales induites  $F_{ai}$  puis de déduire les charges équivalentes  $P_A$  et  $P_B$ .

Les autres calculs ( $L_{10} \dots$ ) ne sont pas différents *de ceux* des autres roulements

## Calcul des roulements

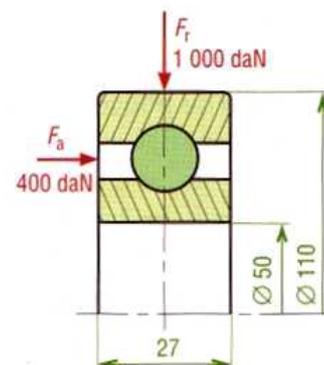
### Calculs des roulements: exemples

#### Exemple 1

Un roulement à billes à contact radial de dimensions

$d = 50$ ,  $D = 110$ ,  $B = 27$ ,  $C = 6\ 200$  daN,  $C_0 = 3\ 800$  daN, supporte la charge combinée  $F_a = 400$  daN et  $F_r = 1\ 000$  daN.

Quelle durée de vie peut-on attendre si la vitesse de rotation de l'arbre est de 150 tr/min ?



$C = 6\ 200$  daN  
 $C_0 = 3\ 800$  daN

$L_{10} = ?$

## Calcul des roulements

### Calculs des roulements

#### Exemple 2

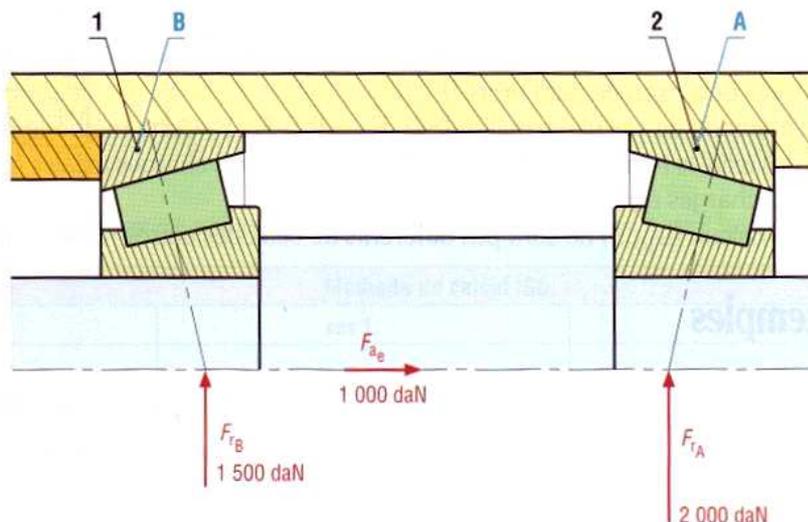
Déterminer la durée de vie  $L_{10E}$  d'un montage de deux roulements à rouleaux coniques 1 et 2, montés en X, tel que  $F_{r1} = 1\,500$  daN,  $F_{r2} = 2\,000$  daN et  $F_{ae} = 1\,000$  daN.

L'effort axial  $F_{ae}$  est supporté par le roulement 2.

Dimensions :  $d = 60$ ,  $D = 95$ ,  $B = 27$ ,  $C = 7\,850$  daN,  
 $C_0 = 7\,650$  daN,  $e = 0,33$ .  $Y = 1,83$  pour le roulement 1  
 $d = 90$ ,  $D = 140$ ,  $B = 39$ ,  $C = 18\,600$  daN,  
 $C_0 = 19\,600$  daN,  $e = 0,27$ ,  $Y = 2,2$  pour le roulement 2

## Calcul des roulements

### Calculs des roulements



#### **Exercice 1**

Reprendre les données de l'exemple 1 avec un roulement à contact oblique à deux rangées de billes,  $d = 50$ ,  $D = 110$

Déterminer la durée de vie du roulement.

#### **Exercice 2**

Reprendre les données de l'exemple 1 avec un roulement à rotule sur rouleaux,  $d = 50$ ,  $D = 110$

Déterminer la durée de vie du roulement.

#### **Exercice 3**

Reprendre les données de l'exemple 2 avec  $F_{rA} = 1\ 000$  daN ;  $F_{rB} = 900$  daN ;  $F_{aE} = 400$  daN ;  $N = 500$  tr/min ;  $C_A = 9500$  daN ;  $e_A = 0,43$  ;  $Y_A = 1,38$  ;  $C_B = 8\ 190$  daN ;  $e_B = 0,46$  ;  $Y_B = 1,31$ .

Déterminer les durées de vie des roulements et celle de l'ensemble.

## Roulements spéciaux

---

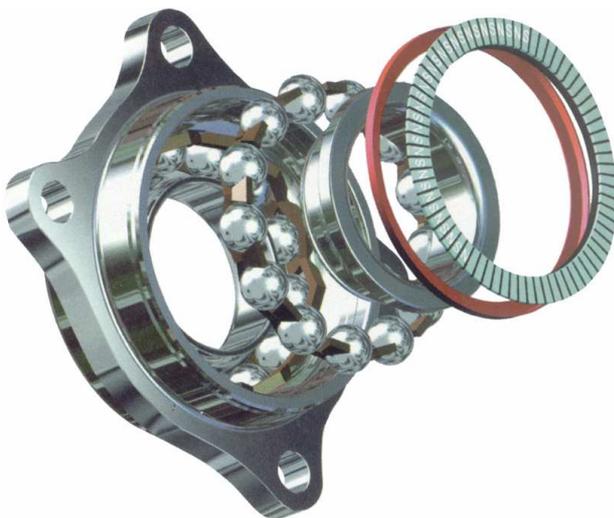


Roulements en  
céramique (1980)

## Roulements spéciaux

---

### *Roulements instrumentés*



Vue éclaté d'un capteur  
incrémental de position  
intégré au roulement



Capteur mécatronique  
(1989)

## Roulements spéciaux

### *Roulements instrumentés*

Dans de nombreux domaines de l'ingénierie, il est essentiel d'obtenir des informations exactes sur le mouvement des composants en rotation ou à déplacement axial.

L'importance du contrôle exact des mouvements ne fait qu'augmenter du fait de l'automatisation croissante de tous les types de processus.

De plus, les concepteurs veulent des systèmes toujours plus légers et plus simples, ce qui mène au développement de solutions intégrées, par exemple en faisant enregistrer par les roulements instrumentés

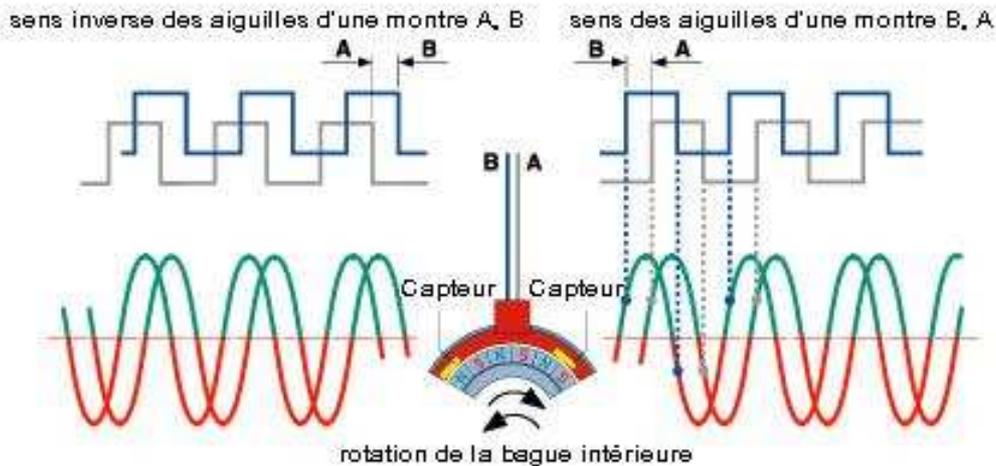
## Roulements spéciaux

### *Roulements instrumentés*



## Roulements spéciaux

### *Roulements instrumentés*



Les roulements instrumentés conçus et brevetés par SKF sont simples et robustes. Ils sont composés des éléments suivants :

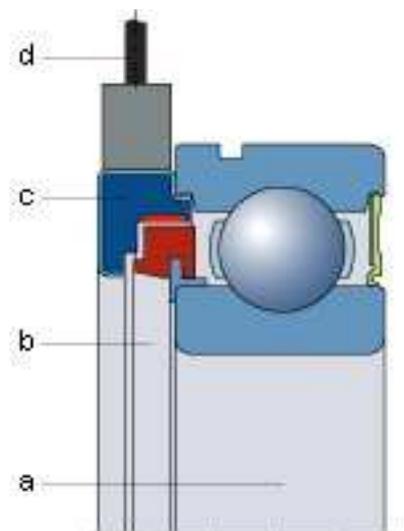
- un roulement rigide à billes
- un capteur actif.

## Roulements spéciaux

### *Roulements instrumentés: conception*

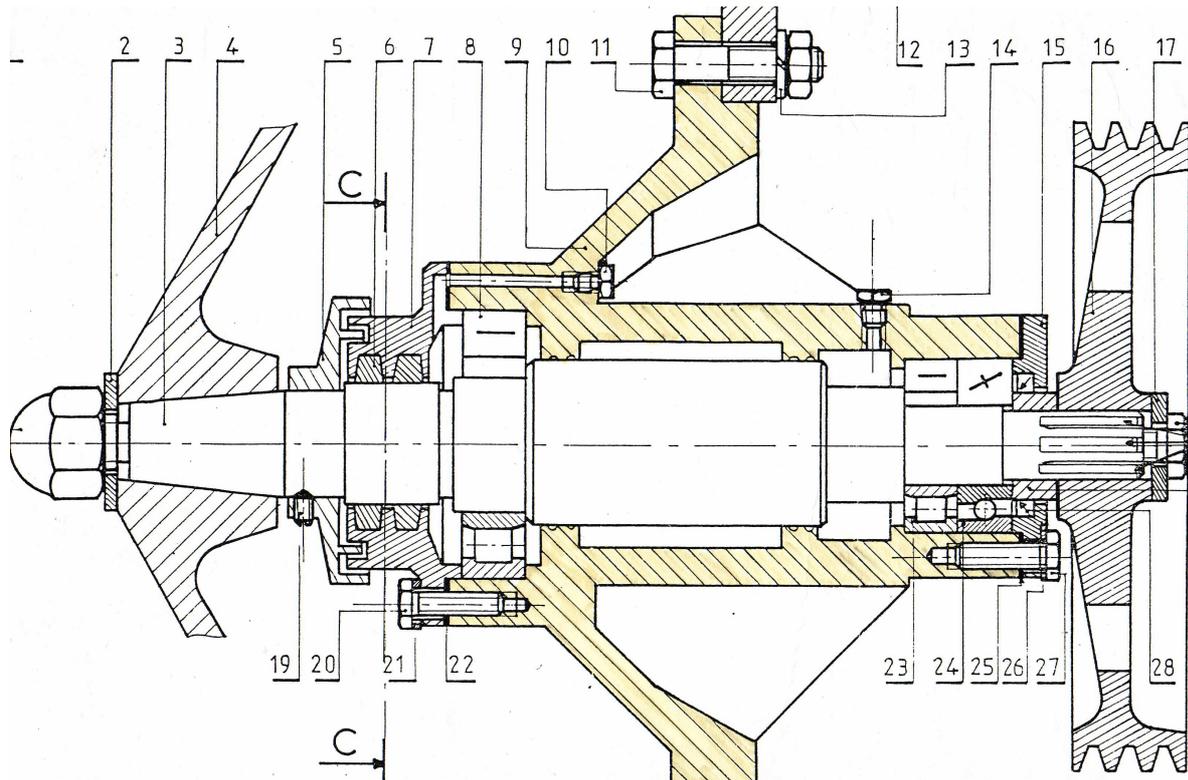
Les roulements instrumentés se composent des éléments suivants :

- un roulement rigide à billes Explorer muni d'un joint d'étanchéité par contact RS1 et d'une rainure pour segment d'arrêt dans la surface extérieure de la bague extérieure (a)
- une bague d'impulsions magnétisée (b)
- un corps de capteur (c)
- un câble de connexion (d).



## Exercice ESSOREUSE A COPEAUX

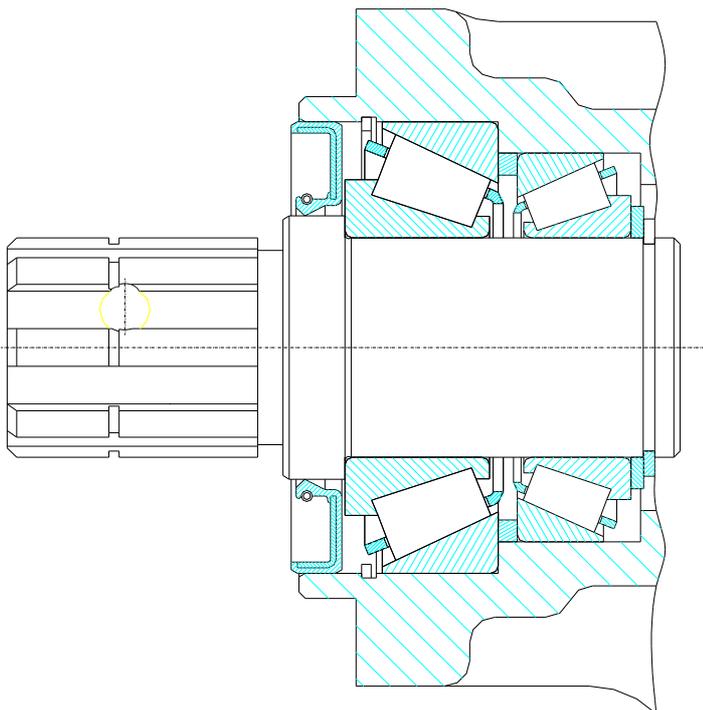
### Montage



Roulements

E.PRESTA 89

## Exercice ESSOREUSE A COPEAUX



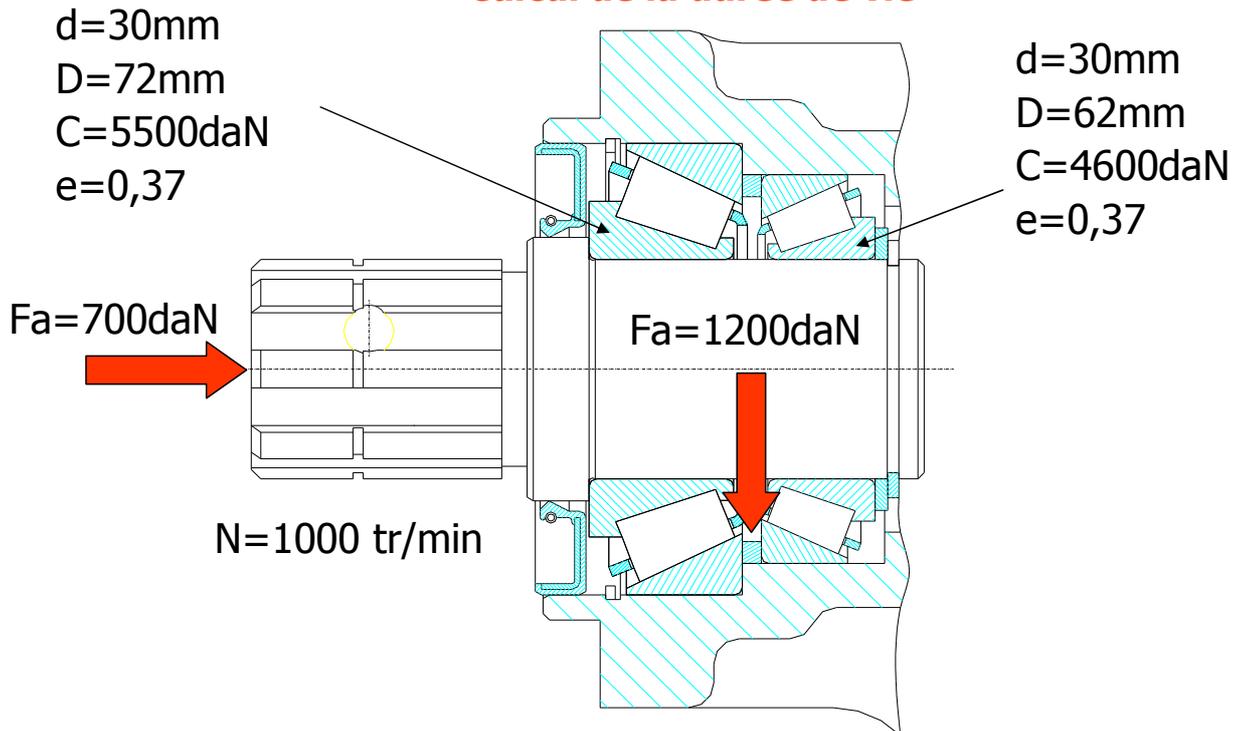
- Désigner le type de montage
- Expliquer à l'aide d'un schéma les règles de montage utilisées
- Donner les ajustement utilisés
- Expliciter le mode opératoire pour monter cet ensemble de pièces
- Déterminer à l'aide de la méthode ISO la durée de vie de l'ensemble
- Comment lubrifie t on le roulement

Roulements

E.PRESTA 90

## Pompe PHP 15

### Calcul de la durée de vie



La charge radiale est supposé localisée au centre de l'espace inter roulement donc chaque roulement supporte une charge de 600 daN

## Détérioration des roulements

### Introduction

Quand on remplace un roulement détruit **prématurément**, il faut **étudier les causes** de cette destruction.

Malheureusement **l'étude des avaries n'est pas facile** : il est plus facile d'identifier une avarie sur un début d'avarie que sur un roulement entièrement cassé

Quoi qu'il en soit, si un incident grave survient, il faut suivre une **méthode rigoureuse pour permettre l'expertise** :

## Détérioration des roulements

---

### *Introduction*

- fournir une bonne **photographie en couleurs** du roulement avant démontage,
- prélever un **échantillon du lubrifiant** en service, éventuellement les joints d'étanchéité voisins,
- **extraire le roulement avec précaution** pour éviter toute détérioration supplémentaire,
- ne **jamais nettoyer le roulement**, au contraire, laisser en place le maximum de graisse,
- placer les pièces à conviction dans un **emballage** qui ne modifie pas les données (sac en plastique par exemple).

Il faut maintenant analyser les principales causes d'avaries ou de destruction des roulements :

## Détérioration des roulements

---

### *Écaillage de fatigue (flaking)*

C'est la **cause normale** de destruction des roulements **correctement montés** et utilisés.

Si la **pression de Hertz** ne dépasse pas 2 000 N/mm<sup>2</sup>, les roulements ont une **durée de vie pratiquement illimitée** à condition que la **lubrification et la propreté soient bonnes**.

En fait, les pressions entre les éléments roulants et les bagues atteignent couramment 3 000 à 3 500 N/mm<sup>2</sup> et des dégâts surviennent sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en sous-couche.

## Détérioration des roulements

---

### *Écaillage de fatigue (flaking)*



## Détérioration des roulements

---

### *Écaillage de fatigue (flaking)*

Les mécanismes de la fatigue par roulement sont à la fois très étudiés et très mal connus.

Toutes les études confirment cependant **l'influence très néfaste** sur la fatigue des roulements des **inclusions non métalliques** ou des anomalies métallurgiques de l'acier

L'écaillage est un **processus continu** qui s'accélère plus ou moins après **l'apparition des premières fissures**.

## Détérioration des roulements

---

### *Écaillage de fatigue (flaking)*

L'**écaillage localisé** et prématuré résulte d'anomalies caractérisées telles que mauvais montage, **surcharge**, **défaut d'alignement**, **mauvaise forme de logement**.

Une limite d'élasticité élevée augmente l'endurance car elle diminue les risques liés à la présence d'inclusions non métalliques.

L'utilisation d'aciers de très haute qualité dégazés sous vide, et mieux refondus sous vide, est aujourd'hui généralisée

## Détérioration des roulements

---

### *Écaillage superficiel (pelling)*

L'**écaillage superficiel** est un **enlèvement superficiel de métal**, plus ou moins étendu, **sous forme de paillettes très fines**.

Il est attribué à une **épaisseur de lubrifiant trop faible** par rapport à la rugosité, ce qui provoque des **contacts métal sur métal**.

Le remède consiste essentiellement à **diminuer la rugosité** et à **augmenter la viscosité du lubrifiant**.