

Roulements

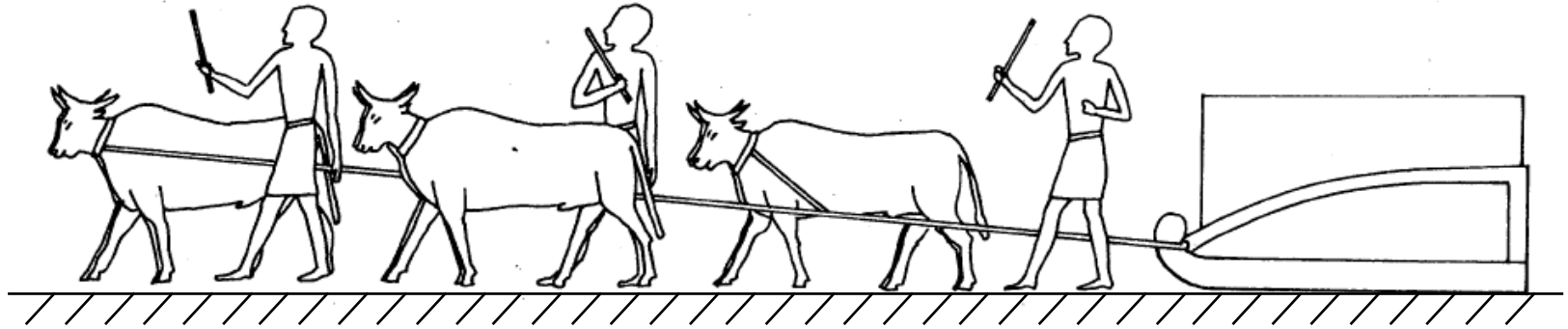


Prof. Simon Henein

Mars 2022

Introduction

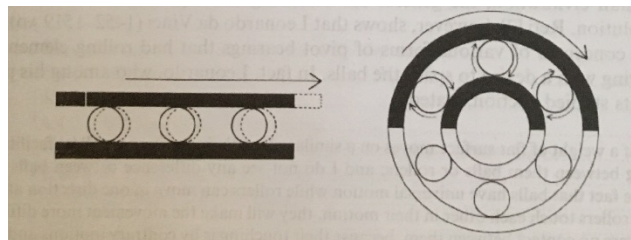
Egyptiens ~2400 av. J.-C.



Assyriens ~1100 av. J.-C.

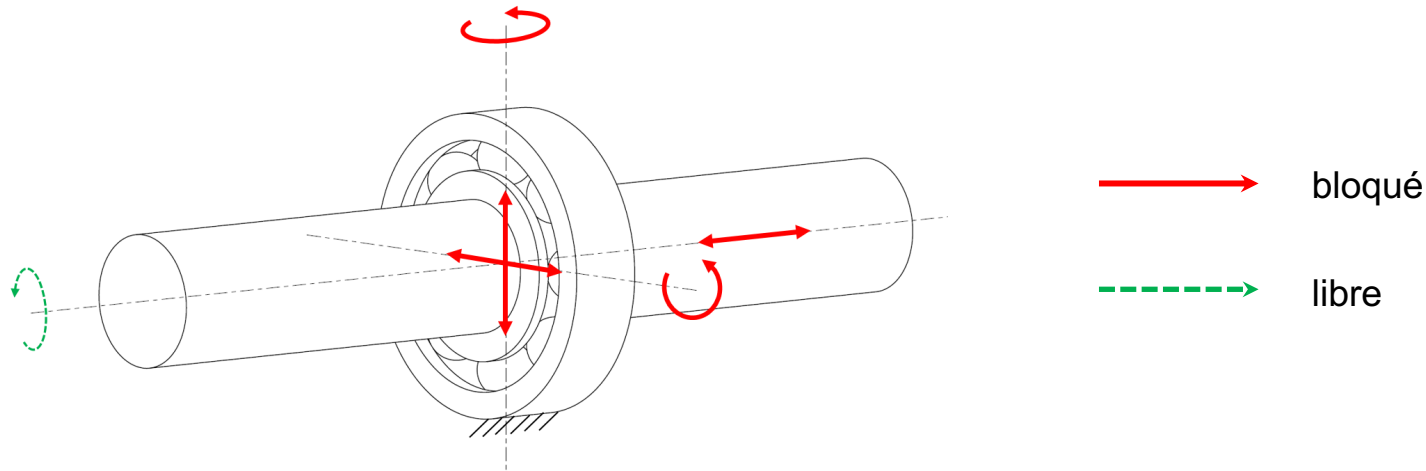


~50 apr. J.-C



Introduction

Les roulements transmettent des efforts entre des pièces de machine, de telle sorte que 1 degré de liberté en rotation soit libre et que les 5 autres soient bloqués.



Avantage des roulements comparés aux paliers lisses (rouler versus glisser):

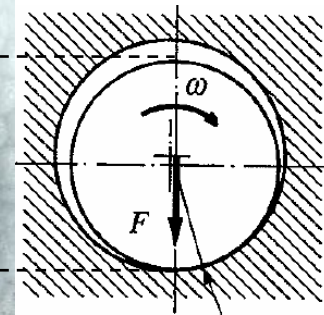
- 80% à 95% de frottement en moins (e.g. $\mu \cong 0.0015$ à 0.002 pour les roulements à billes)
- Frottement statique $\mu_0 \cong$ frottement dynamique μ

Désavantages

- Sensibilité accrue aux salissures, aux chocs et aux mouvements oscillants de faible amplitude
- Encombrement supérieur (voir illustration ci-contre)
- Bruyant à haute vitesse (exemple: moteurs électriques)

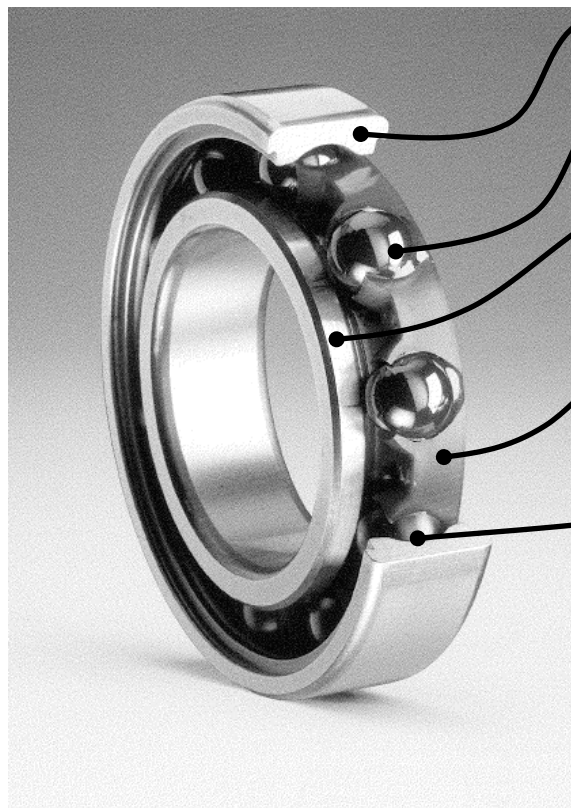


Roulement



Palier lisse

Éléments constitutifs et terminologie



Bague extérieure



Corps roulants (bille, rouleau, aiguille, cône...)



Bague intérieure



Cage

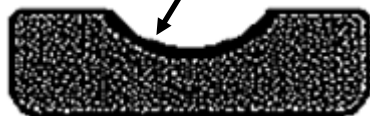


Lubrifiant



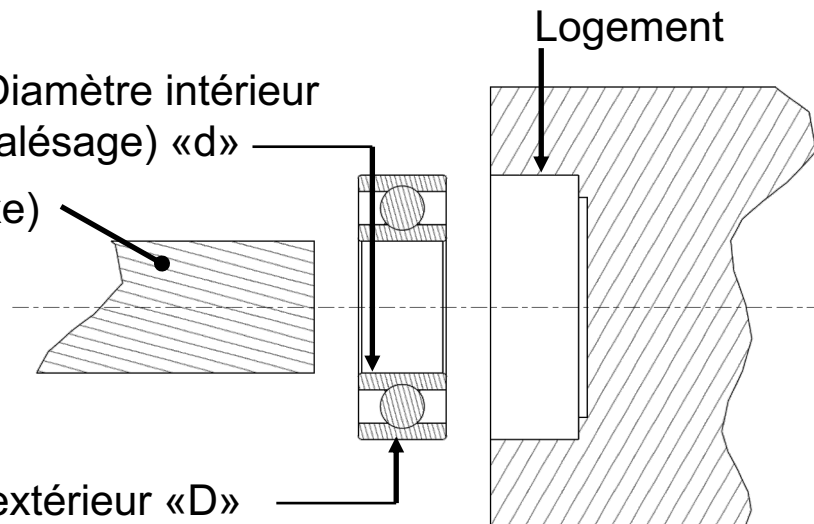
Joint (optionnel)

Chemin (ou piste) de roulement



Diamètre intérieur
(alésage) «d»

Arbre (axe)



Diamètre extérieur «D»

Couple de frottement

• Roulements

$$M = \frac{\mu \cdot P \cdot d}{2}$$

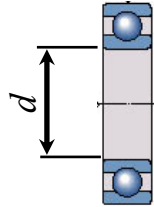
Coefficient de frottement

$\mu \cong 0.0015$ pour les roulements à billes selon SKF

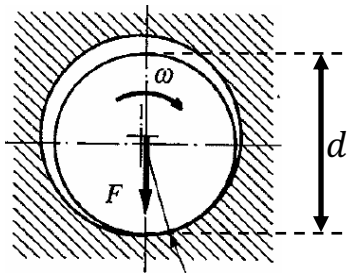
Charge dynamique équivalente (voir p. 41 à 43)

Diamètre intérieur du roulement

Couple de frottement



• Palier lisse

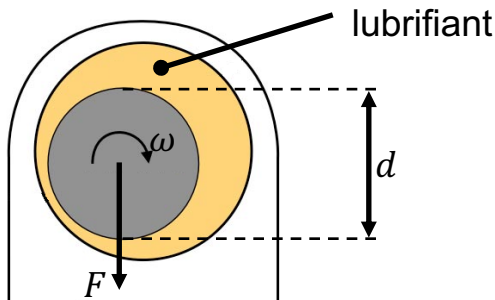


$$M \cong \frac{\mu \cdot F \cdot d}{2}$$

Valeurs indicatives

Nature des matériaux en contact	Adhérence : $\mu_s = \tan \varphi_s$		Frottement : $\mu = \tan \varphi$	
	à sec	lubrifié	à sec	lubrifié
Acier sur acier	0.18	0.12	0.15	0.09
Acier sur fonte	0.19	0.1	0.16	0.08 à 0.04
Téflon sur acier	0.04		0.04	
Nylon sur acier			0.35	0.12
Bois sur bois	0.65	0.2	0.4 à 0.2	0.16 à 0.04
Métaux sur bois	0.6 à 0.5	0.1	0.5 à 0.2	0.08 à 0.02
Métal sur glace			0.02	
Pneu de voiture sur route	0.8		0.6	0.3 à 0.1 (sol mouillé)

• Palier hydrostatique ou hydrodynamique



$$M \cong \frac{\mu \cdot F \cdot d}{2}$$

$$0.001 < \mu < 0.002$$

Si ω est suffisamment élevé pour les paliers hydrodynamiques, sinon c'est un simple palier lisse lubrifié.

Capacité de charge

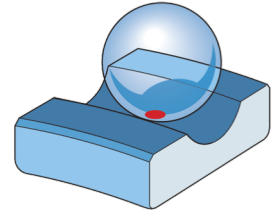
La capacité de charge et la rigidité augmentent avec:

- Contact linéique plutôt que ponctuel
(rouleaux, aiguilles, cônes plutôt que billes)
- Grand nombre de corps roulants
(roulement sans cage, roulement avec encoche de remplissage)

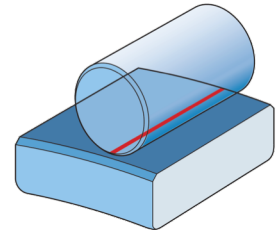


Types de contact

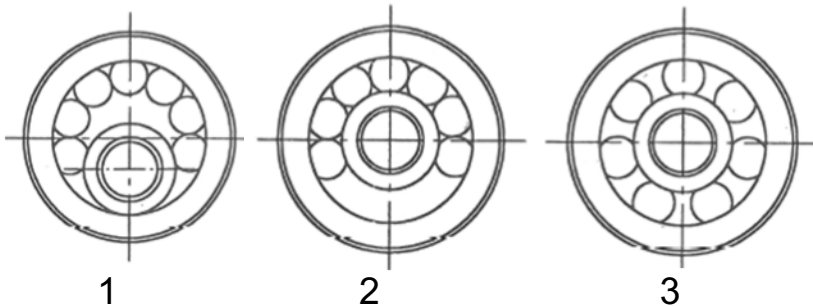
Ponctuel



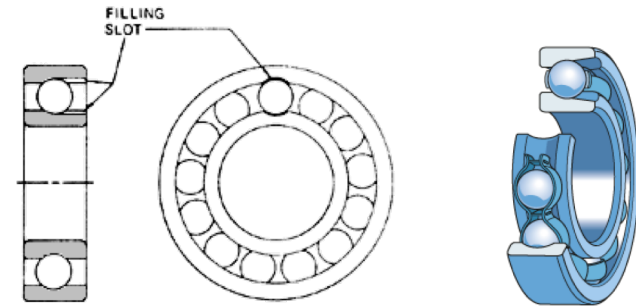
Linéique



Nombre restreint de corps roulants:
pas besoin d'encoche de remplissage



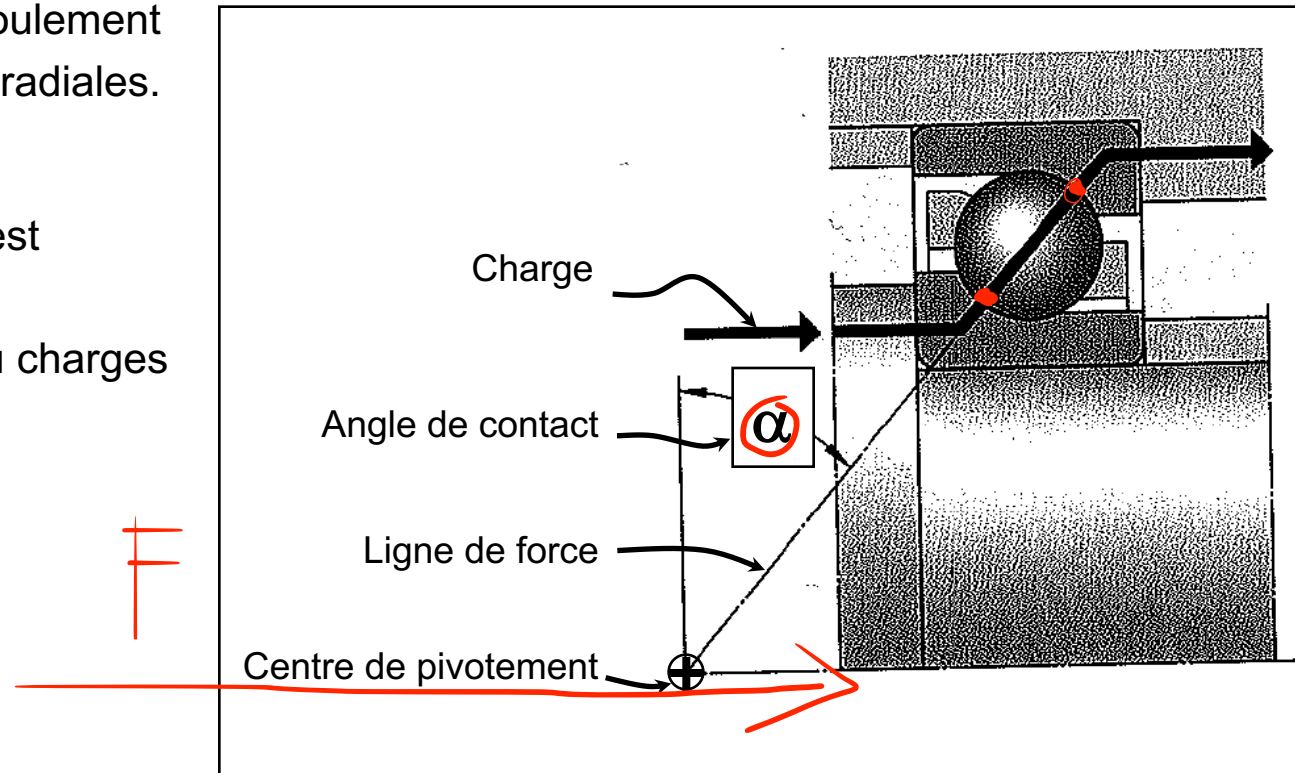
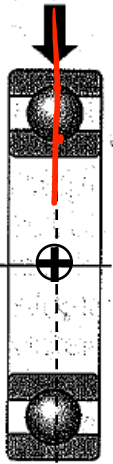
Grand nombre de corps roulants:
encoche de remplissage requise



- Charge parallèle aux lignes de force du roulement
(choix adéquat de l'angle de contact): voir pages suivantes

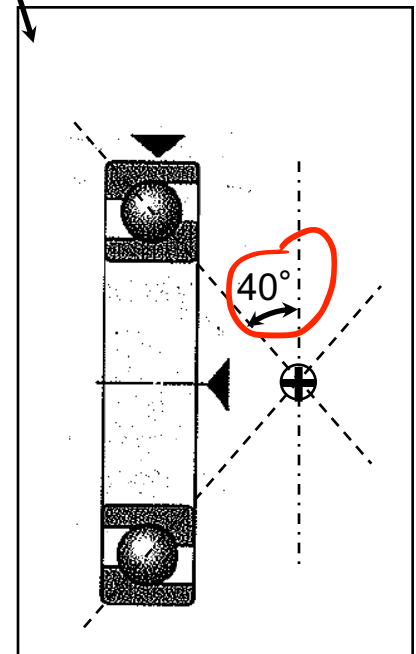
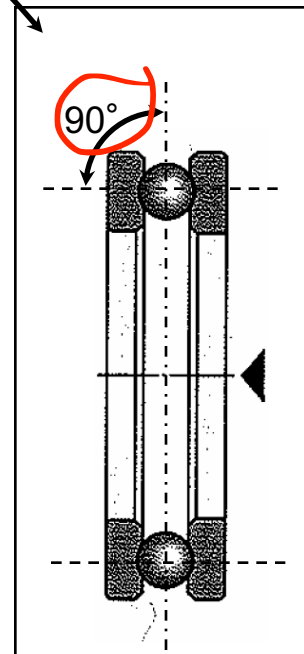
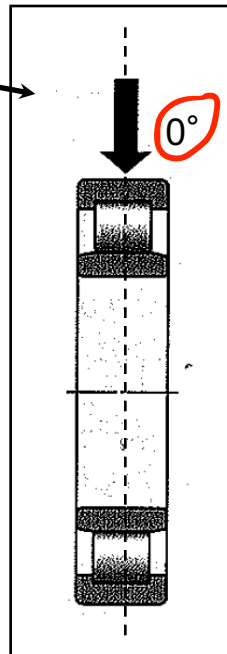
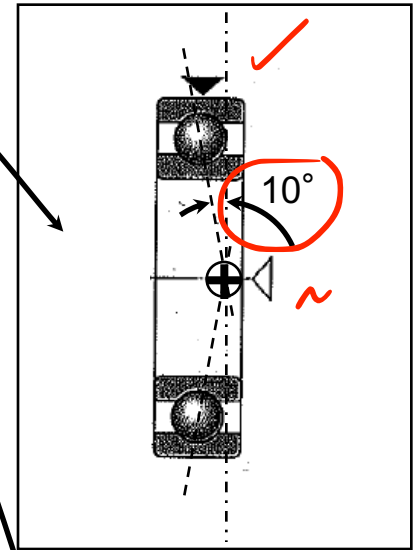
Angle de contact

- Un roulement a une capacité de charge et une rigidité maximales lorsque la charge est parallèle aux lignes de force (e.g. charge purement radiale sur un roulement à billes à gorges profondes).
- Plus l'angle de contact est proche de 0° , plus le roulement est adapté aux charges radiales.
- Plus l'angle de contact est proche de 90° , plus le roulement est adapté aux charges axiales.



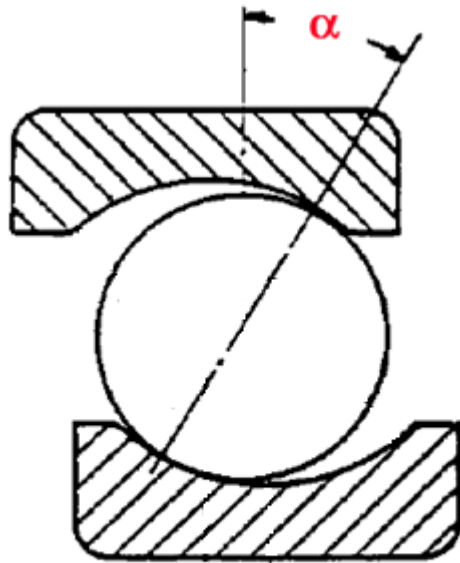
Angle de contact: valeurs typiques

- Roulement à billes à gorges profondes: 4° à 10°
(dépend du jeu du roulement)
- Roulement à billes à contact oblique: 10° à 40°
- Butée axiale: 90°
- Roulement à rouleaux: 0°

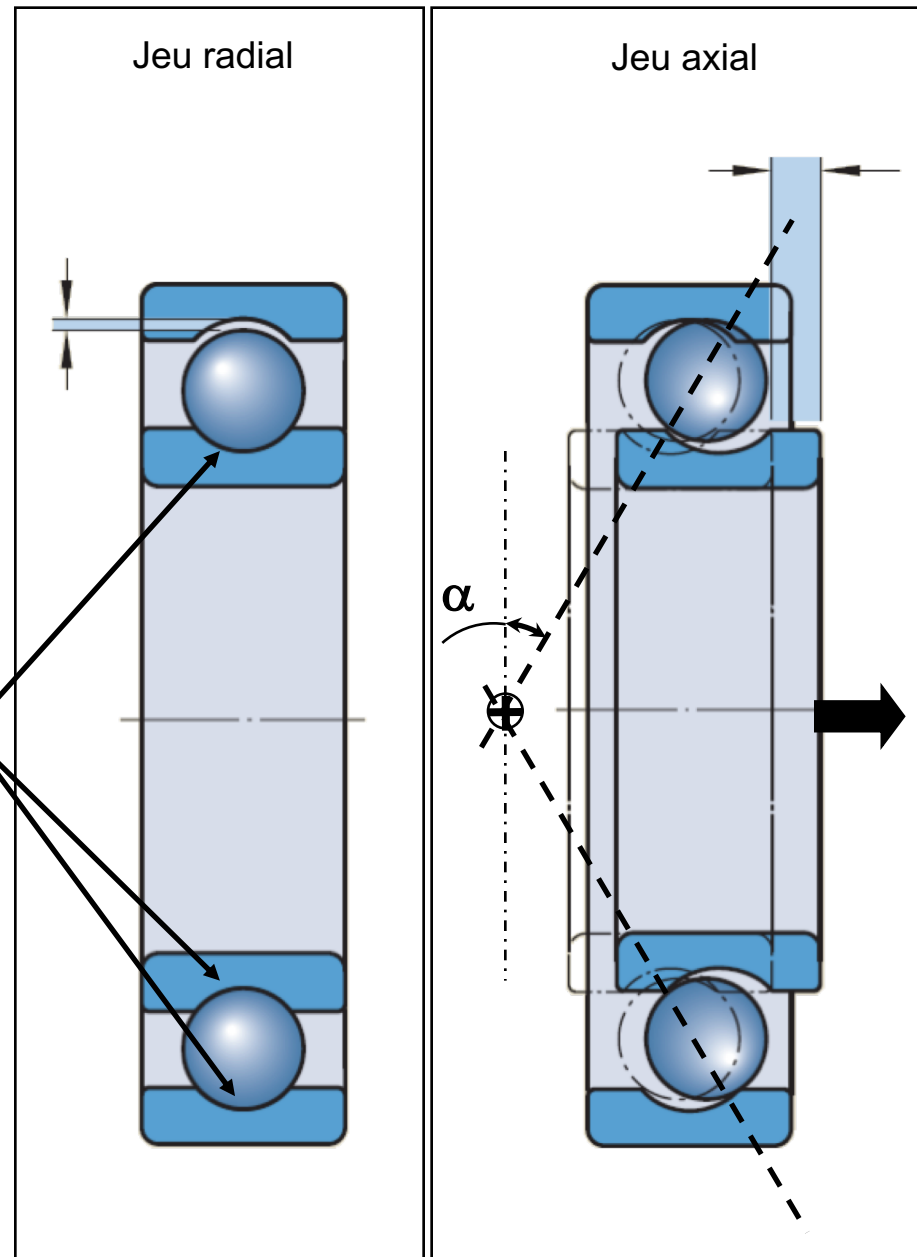


Angle de contact des roulements à gorges profondes

- L'angle de contact (et la capacité de charge axiale) des roulements à gorges profondes est d'autant plus grand que le roulement choisi a un jeu important.

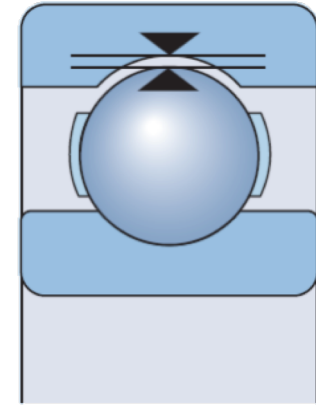


contact



Jeu radial des roulements à gorges profondes

- Exemple de valeurs du catalogue SKF

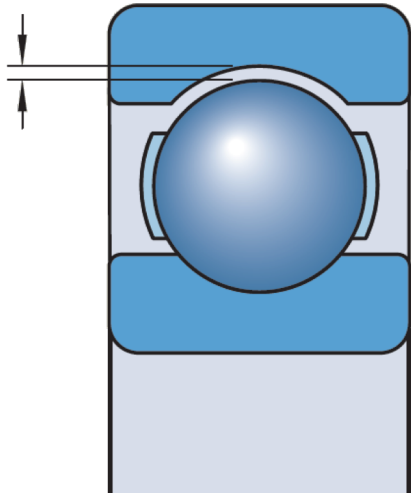


Diamètre d'alésage		Jeu radial interne		Normal		C3		C4		C5	
sup. à	incl.	C2 min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
mm		μm									
2,5	6	0	7	2	13	8	23	–	–	–	–
6	10	0	7	2	13	8	23	14	29	20	37
10	18	0	9	3	18	11	25	18	33	25	45
18	24	0	10	5	20	13	28	20	36	28	48
24	30	1	11	5	20	13	28	23	41	30	53
30	40	1	11	6	20	15	33	28	46	40	64
40	50	1	11	6	23	18	36	30	51	45	73
50	65	1	15	8	28	23	43	38	61	55	90
65	80	1	15	10	30	25	51	46	71	65	105

Facteurs influençant le jeu radial des roulements à gorges profondes

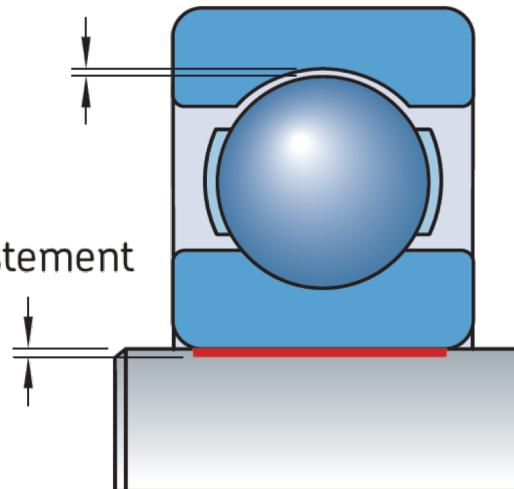
Montage chassé (serrage)

Jeu avant montage

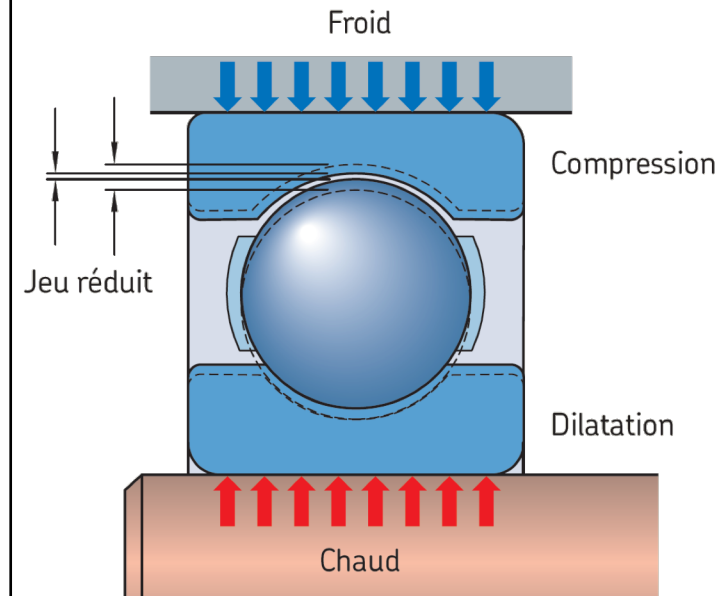


Jeu après montage

Ajustement

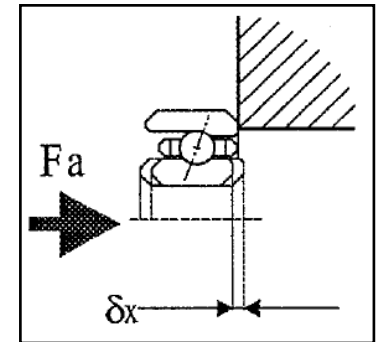
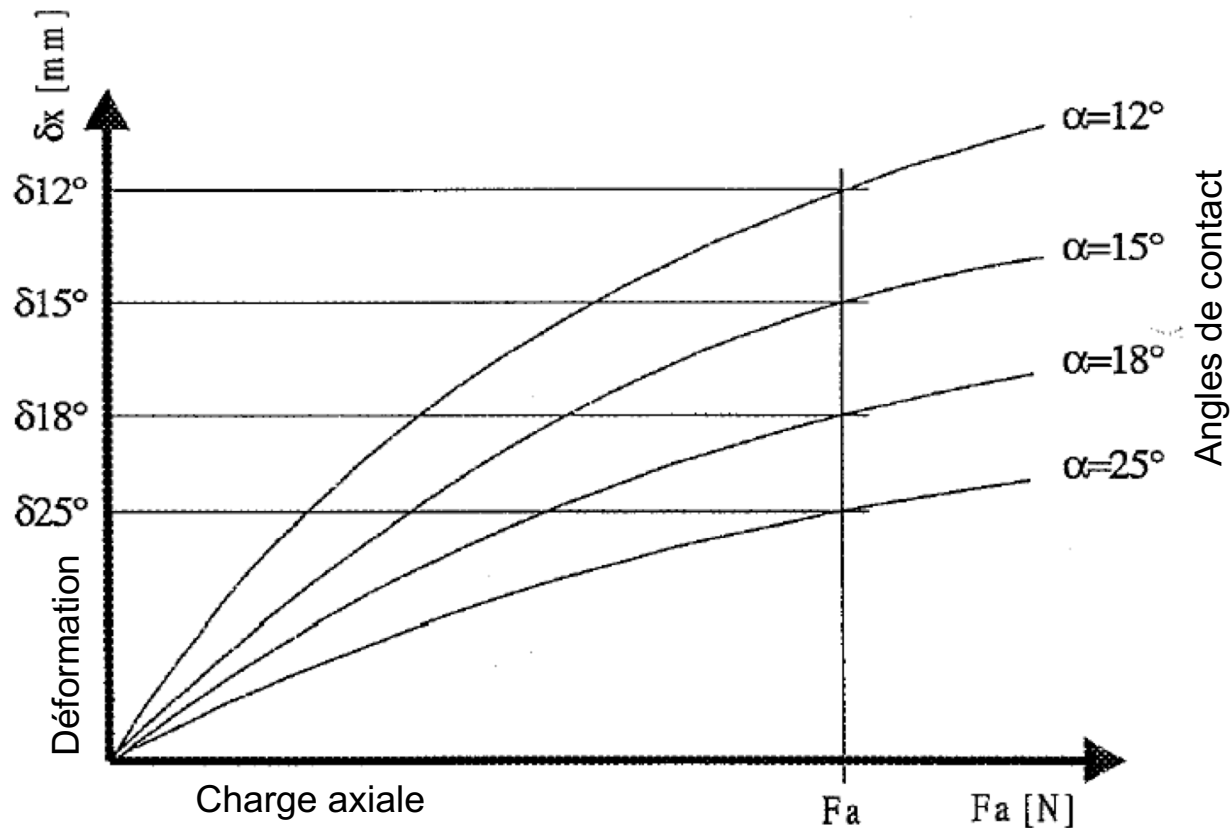


Dilatations thermiques

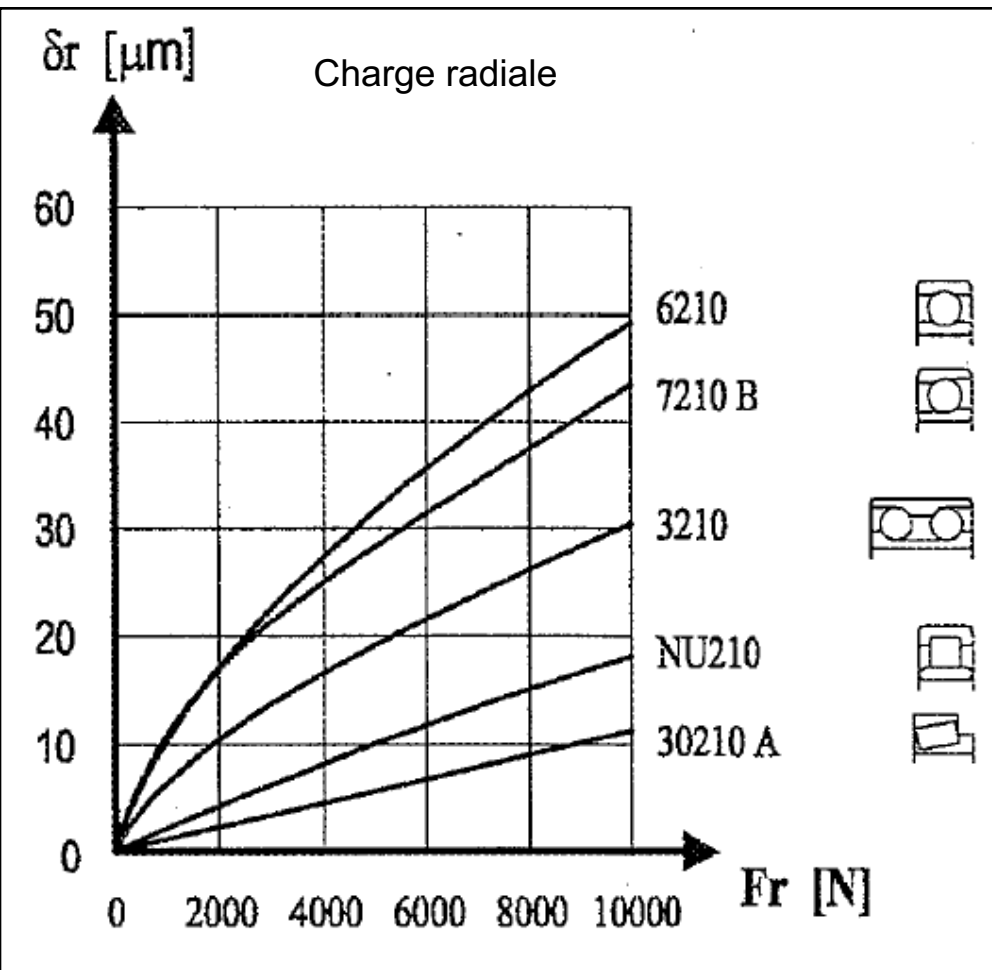


Rigidité et précharge

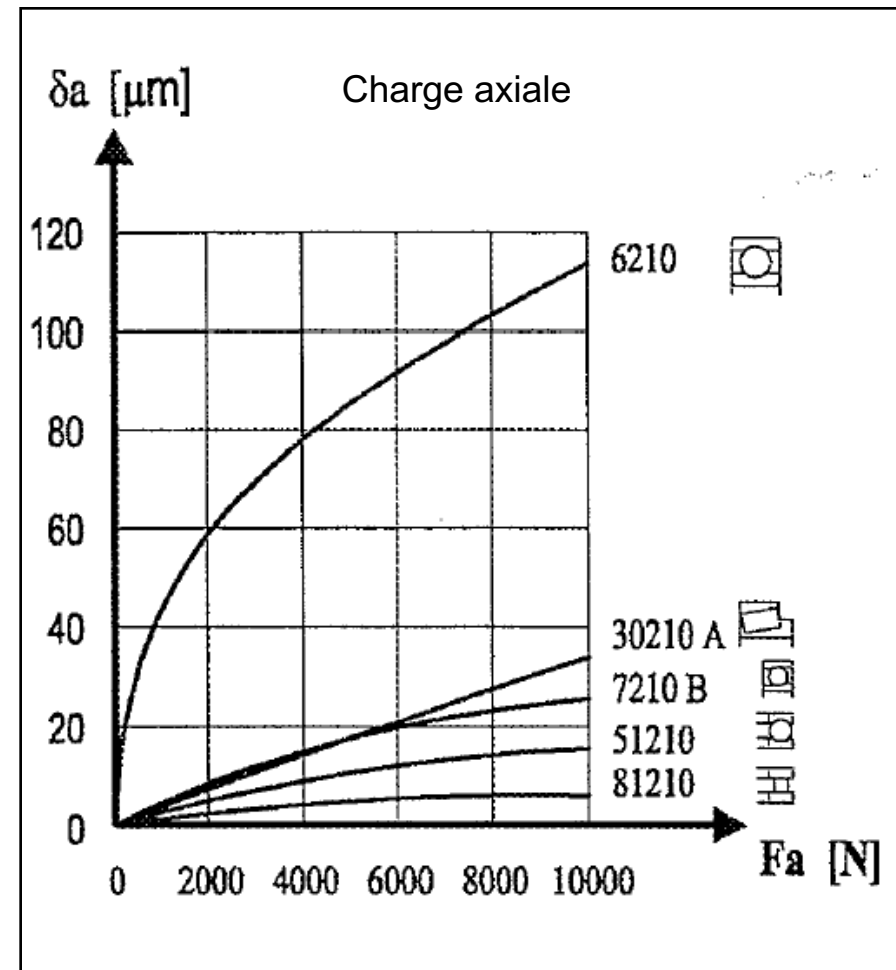
- La précharge augmente la rigidité
(mais augmente le frottement de roulement et l'usure)



Rigidité: exemples de quelques roulements



6210, 7210 B, NU 210, 30210 A:
3210:
51210, 81210:

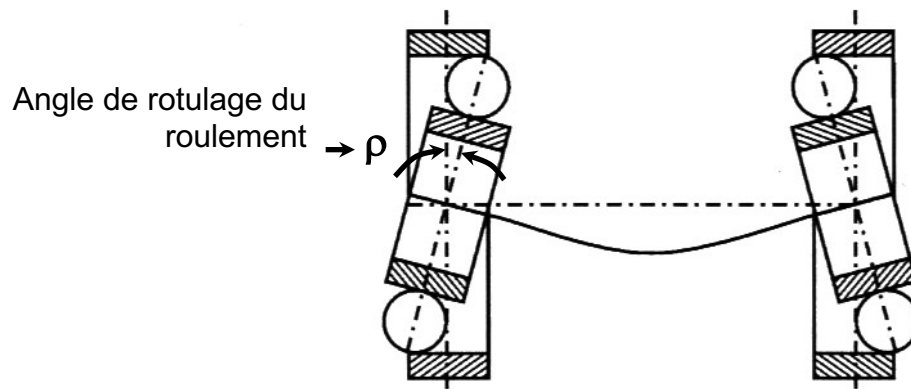


dimensions: 50 x 90x 20 mm
dimensions: 50 x 90x 30 mm
dimensions: 50 x 78x 22 mm

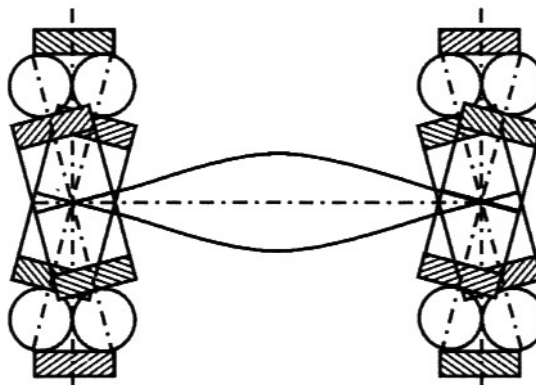
Rotulage (ou déversement)

- Les erreurs d'alignement doivent être tolérées par les roulements.

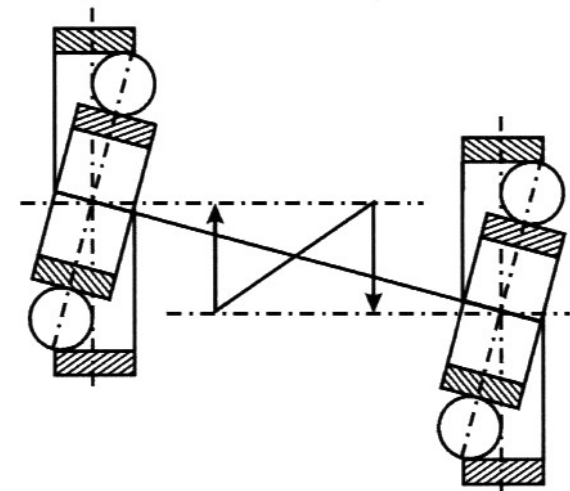
Causes possibles d'erreurs d'alignement:



Arbre fléchi, statique



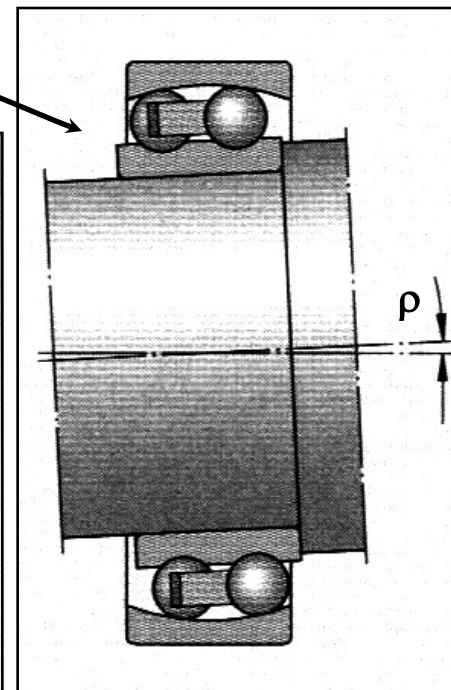
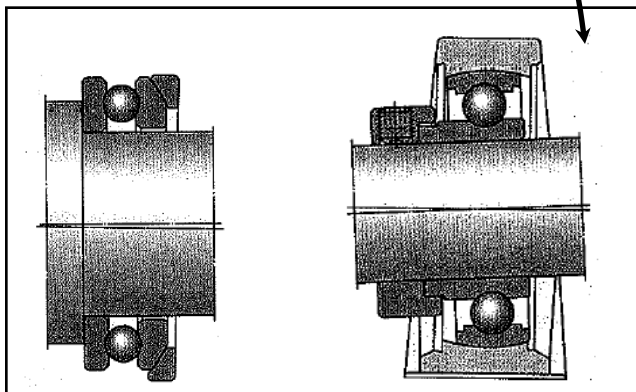
Arbre fléchi, en rotation



Désalignement des logements

Valeurs typiques d'angle de rotulage admissibles:

- Roulement à billes à gorges profondes: 0.03° à 0.15°
- Paire de roulements à billes à contact oblique montés en O: pratiquement 0°
- Paire de roulements à billes à contact oblique montés en X: environ 0.03° à 0.15°
- Roulement à rotule sur billes: 1.5° à 3°
- Butée à rotule sur rouleaux: 0.3° à 3°
- Pour rotulage de plusieurs degrés



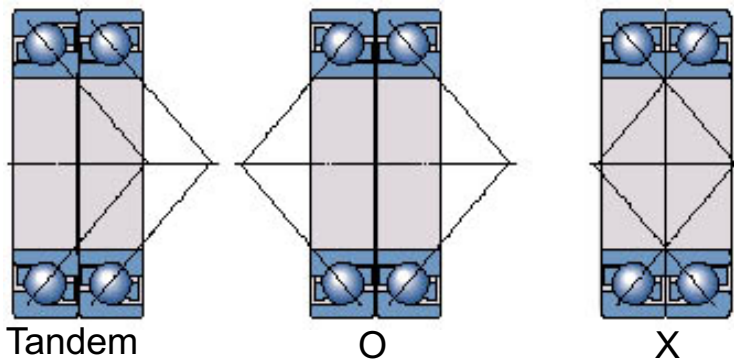
Roulement à billes à gorges profondes (rigide à billes)

- Le plus courant et le meilleur marché
- Angle de contact: 4° à 10°
 - Supporte de grandes charges radiales
 - Supporte de faibles charges axiales dans 2 sens
- Angle de rotulage admissible: 0.03° à 0.15°
- Un roulement seul a du jeu radial et axial
(de 2 à 25 μm pour les roulements de $\varnothing < 50\text{mm}$)
- Existe en très petites dimensions (horlogerie)
- 2 roulements peuvent être montés en O ou en X
comme les roulements à contact oblique



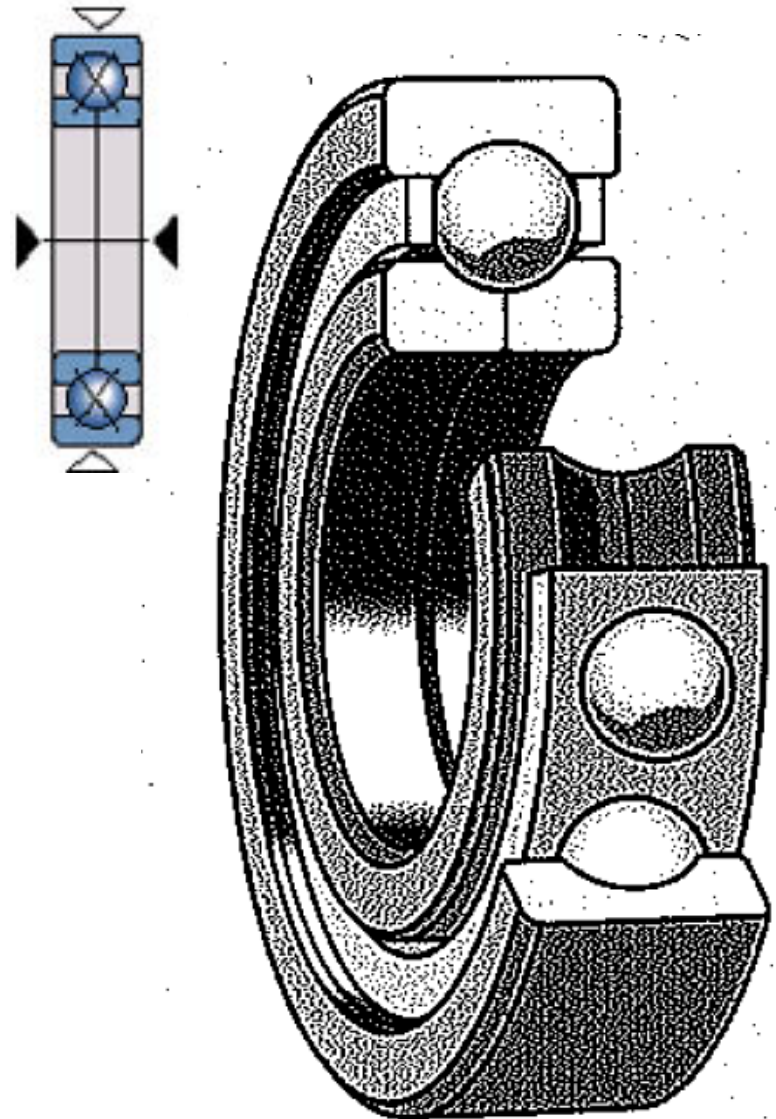
Roulement à billes à contact oblique

- Angle de contact: 10° à 40°
 - Supporte de grandes charges radiales
 - Supporte de grandes charges axiales dans 1 sens
- Angle de rotulage admissible: nul en O, très faible en X et en tandem
- Peut être acheté par paires pour être monté côte à côte et donner un jeu précis ou une précharge (jeu nul) contrôlée

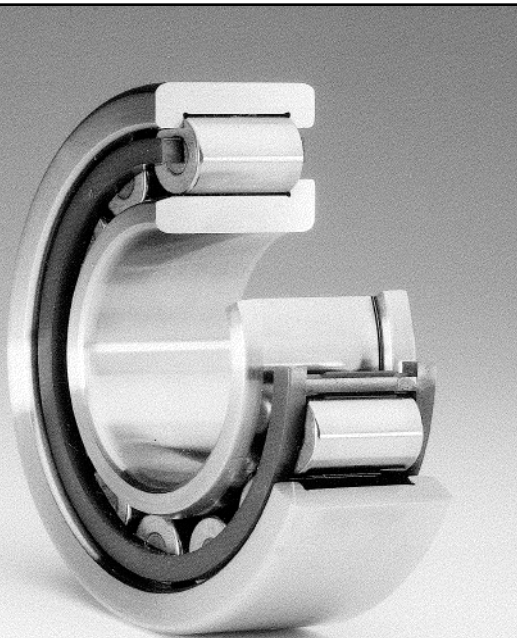


Roulement à 4 points de contact

- Similaire aux roulements à billes à gorges profondes mais avec un angle de contact supérieur:
 - Supporte de petites charges radiales
 - Supporte de grandes charges axiales dans 2 sens
- Très peu encombrant en comparaison des paires de roulements à contact oblique



Autres exemples de roulements peu utilisés en microtechnique



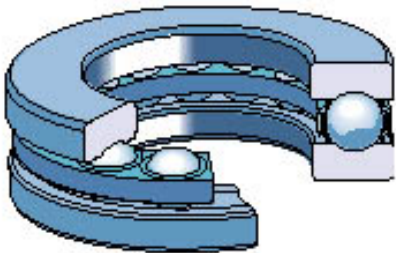
Roulement à rouleaux cylindriques



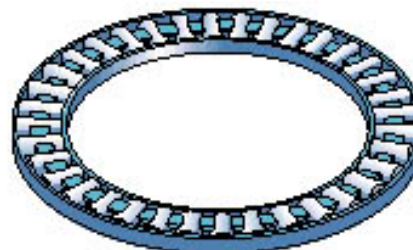
Roulement à rotule sur rouleaux



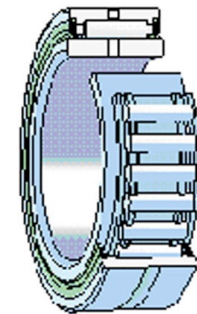
Roulement à rouleaux toroïdaux



Butée axiale à billes

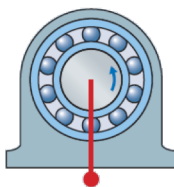
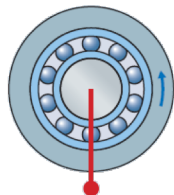
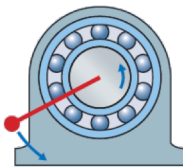
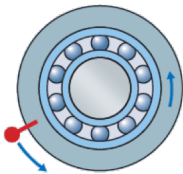


Butée axiale à aiguilles



Roulement à aiguilles

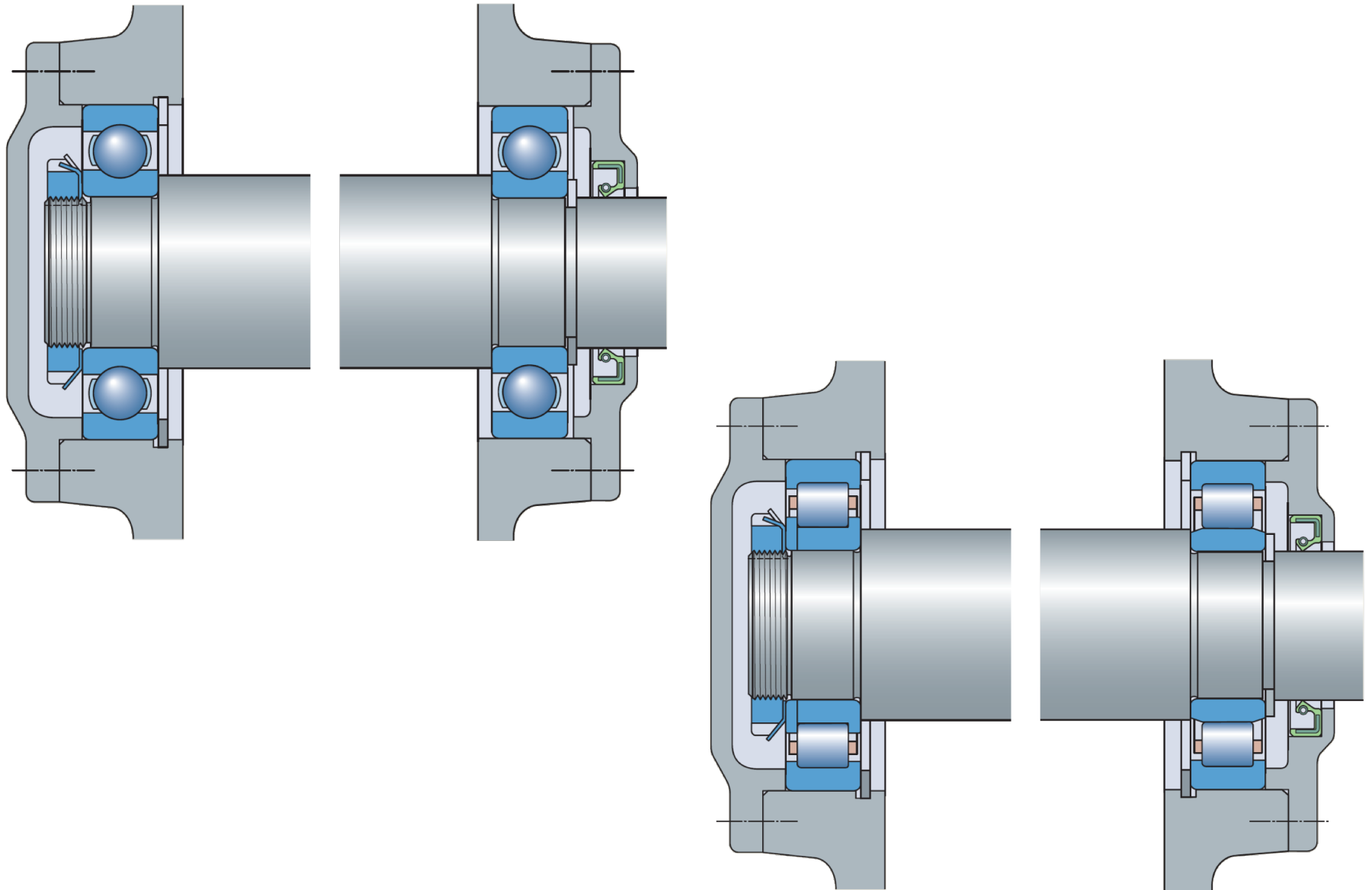
Charge tournante versus fixe

Conditions de fonctionnement	Illustration schématique	Condition de la charge	Exemple	Ajustements recommandés
Bague intérieure tournante Bague extérieure fixe Direction de charge constante		Charge tournante sur la bague intérieure Charge fixe sur la bague extérieure	Arbres entraînés par courroie	Ajustement serré pour la bague intérieure Ajustement libre possible pour la bague extérieure
Bague intérieure fixe Bague extérieure tournante Direction constante de la charge		Charge fixe sur la bague intérieure Charge tournante sur la bague extérieure	Galets tendeurs de convoyeurs Roulements de moyeu de roue de voiture	Ajustement libre possible pour la bague intérieure Ajustement serré pour la bague extérieure
Bague intérieure tournante Bague extérieure fixe La charge tourne avec la bague intérieure		Charge fixe sur la bague intérieure Charge tournante sur la bague extérieure	Applications vibrantes Moteurs vibrants ou cribles	Ajustement serré pour la bague extérieure Ajustement libre possible pour la bague intérieure
Bague intérieure fixe Bague extérieure tournante La charge tourne avec la bague extérieure		Charge tournante sur la bague intérieure Charge fixe sur la bague extérieure	Concasseur giratoire (Entraînement de manèges)	Ajustement serré pour la bague intérieure Ajustement libre possible pour la bague extérieure

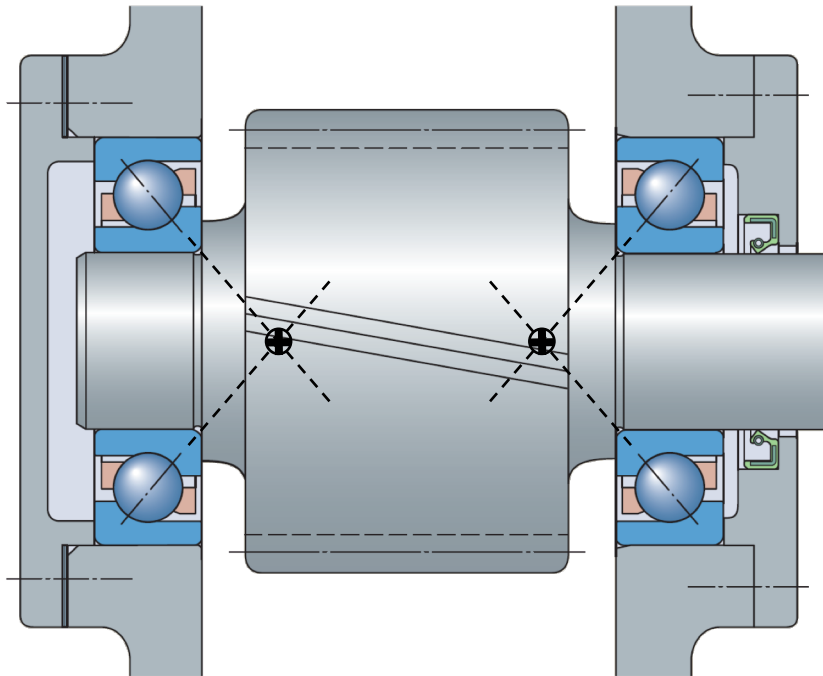
Si une bague, sur laquelle la charge est tournante, n'est pas montée avec serrage, elle risque de subir un phénomène de détérioration par «**usure de contact**» ou «**usure induite par de petits déplacements**», parfois appelée «**corrosion de contact**» («fretting» ou «fretting corrosion» en anglais).

L'usure de contact intervient lorsque deux pièces en contact effectuent de petits mouvements relatifs oscillants, même pour des amplitudes de mouvement aussi faibles que 1 µm.

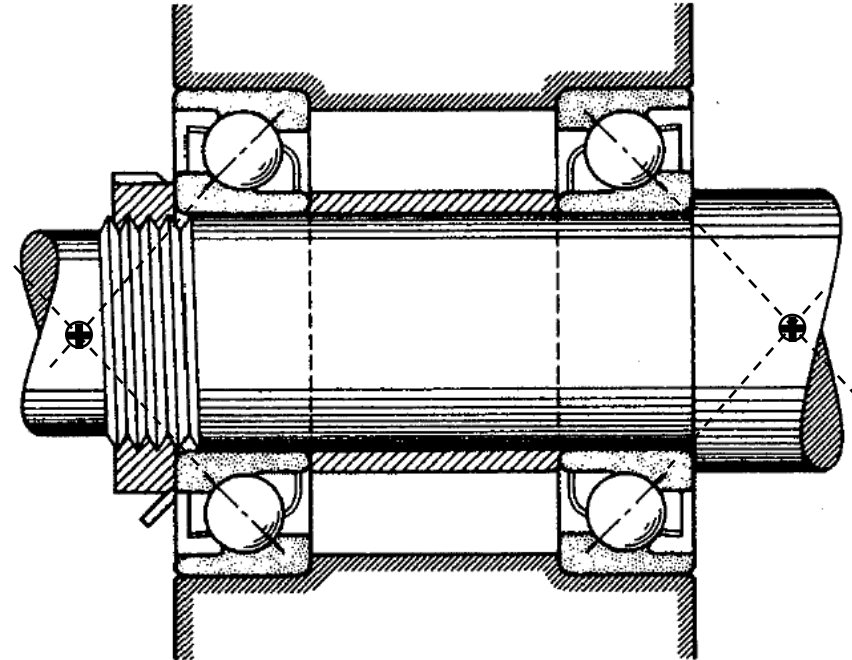
Montage classique avec jeu axial



Montage de 2 roulements à contact oblique «en opposition»



Montage en X



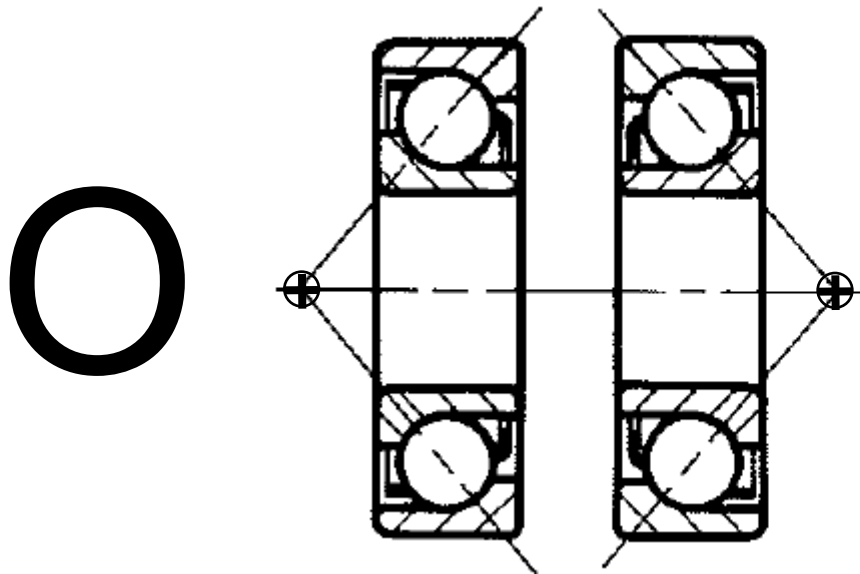
Montage en O

Attention aux dilatations thermiques, en particulier avec des arbres longs

Montages en O et en X

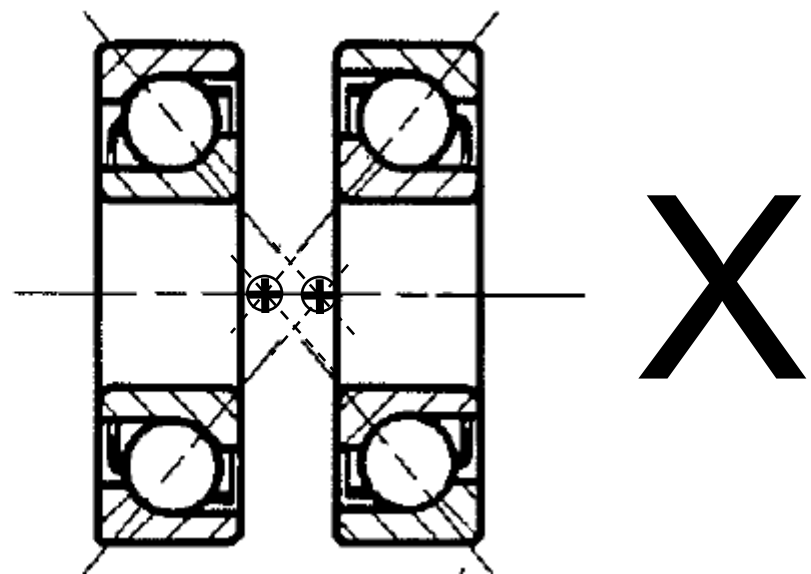
- Distance entre les centres de pivotement augmentée

- rigidité angulaire augmentée
- rotulage admissible réduit



- Distance entre les centres de pivotement réduite

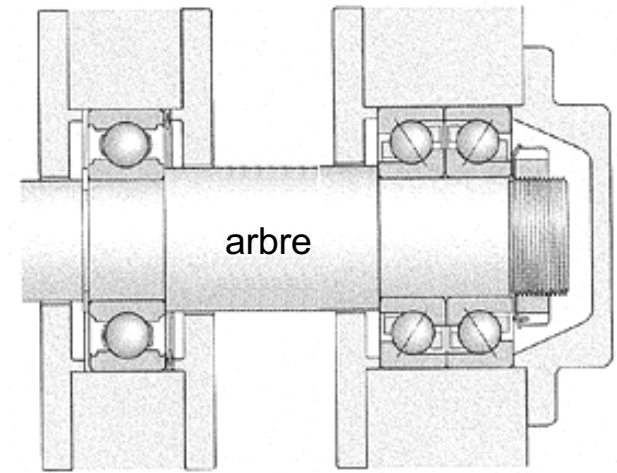
- rigidité angulaire réduite
- rotulage admissible augmenté



Remarque: la différence entre les propriétés des montages O et X est particulièrement grande lorsque les roulements sont montés côte à côte.

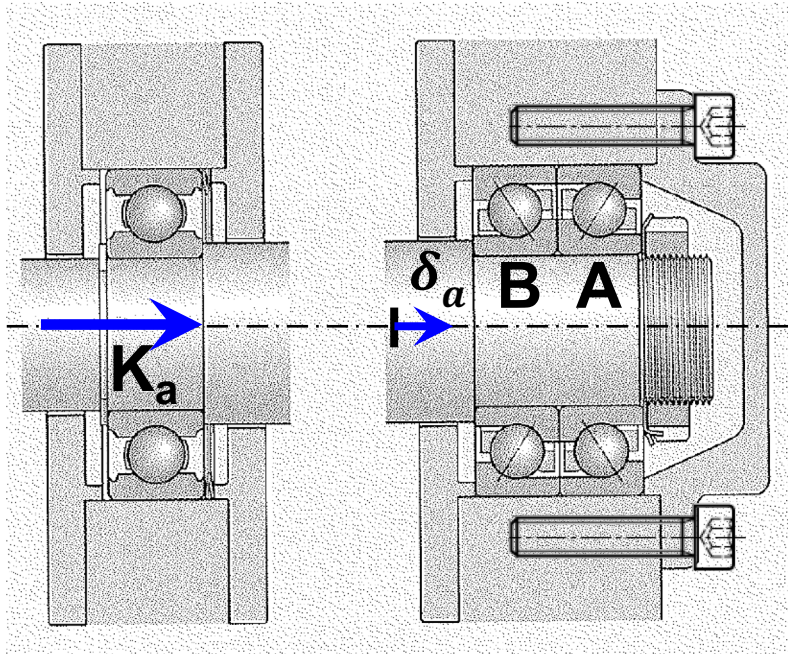
Règles habituelles de montage

1. Un arbre est supporté par un ou au maximum deux roulements (ou groupes de roulements).
2. Si deux roulements (ou groupes) sont utilisés:
 - seul l'un des deux bloque la position axiale de l'arbre dans une direction (l'autre est axialement flottant). Idem dans l'autre direction;
 - chaque roulement (ou groupe) devrait, si possible, avoir du rotulage.
3. Si une grande rigidité angulaire est requise, on écarte les centres de pivotement au maximum (e.g. montage en O). Si au contraire un angle de rotulage (déversement) est requis, on rapproche aux maximum les centres de pivotement (e.g. montage en X).
4. Si une bague du roulement voit la charge tourner, elle doit être ajustée avec serrage. Sinon elle peut être ajustée avec jeu.
En règle générale, chaque roulement d'un même montage a une bague ajustée serrée et l'autre ajustée avec jeu car le jeu simplifie les assemblages.
5. Des verrouillages par obstacles évitent un déplacement axial des bagues ajustées avec serrage sous l'effet de vibrations ou chocs.



Montages sans jeu axial

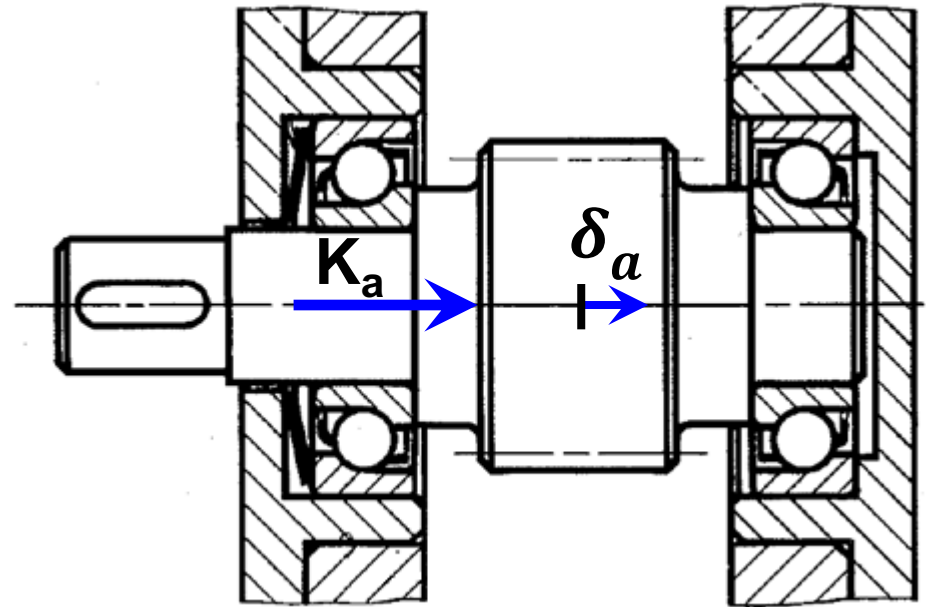
Type I



Montage à deux roulements
à contact oblique appariés

Précharge géométrique

Type II



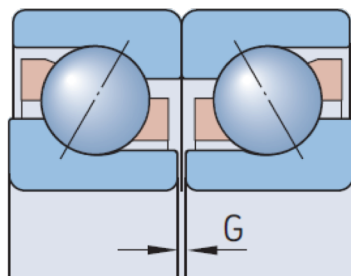
Montage à deux roulements
à contact oblique avec
rondelle élastique

Précharge élastique

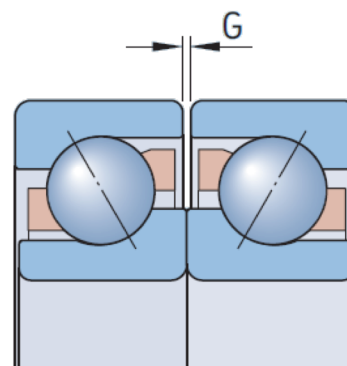
Précharge géométrique

Précharges des roulements à billes à contact oblique à une rangée à appariement universel disposés en O ou en X

Montage en O

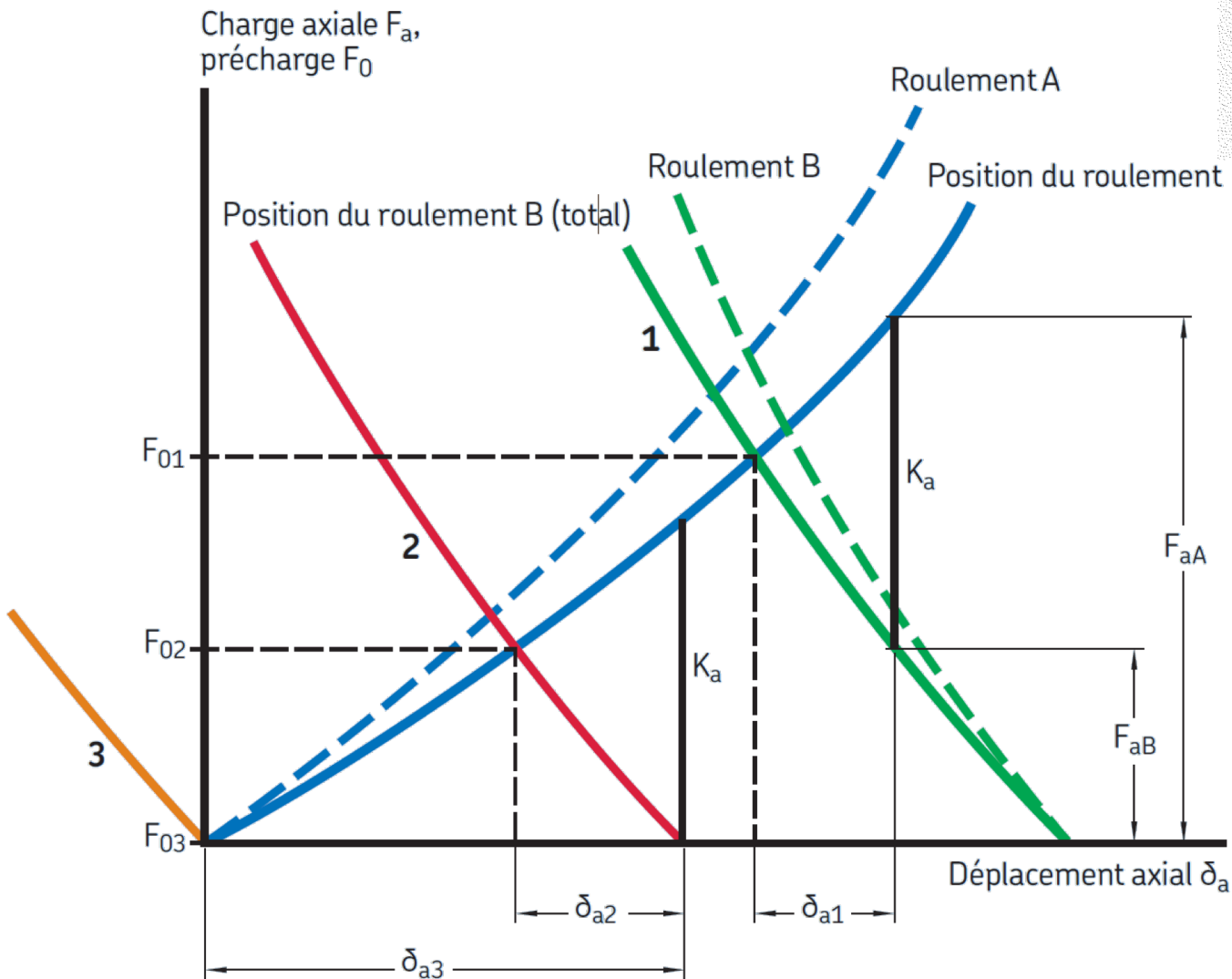
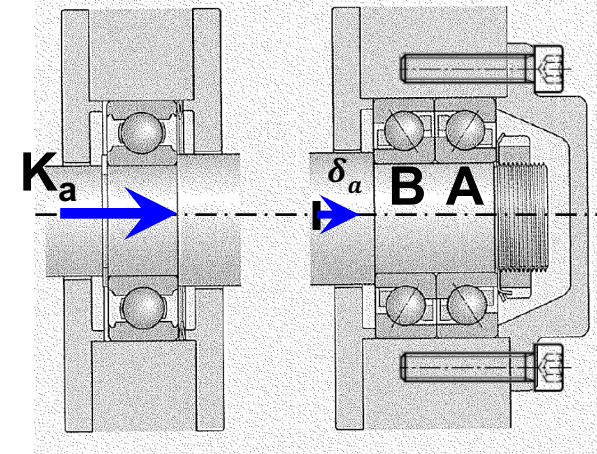


Montage en X



Diamètre d'alésage		Précharge										
sup. à	incl.	Classe	GA		GB				GC			
		min.	max.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
mm		µm		N	µm		N		µm		N	
10	18	+4	−4	80	−2	−10	30	330	−8	−16	230	660
18	30	+4	−4	120	−2	−10	40	480	−8	−16	340	970
30	50	+4	−4	160	−2	−10	60	630	−8	−16	450	1 280
50	80	+6	−6	380	−3	−15	140	1 500	−12	−24	1 080	3 050
80	120	+6	−6	410	−3	−15	150	1 600	−12	−24	1 150	3 250
120	180	+6	−6	540	−3	−15	200	2 150	−12	−24	1 500	4 300
180	250	+8	−8	940	−4	−20	330	3 700	−16	−32	2 650	7 500

Rigidité du montage de type I (précharge géométrique)

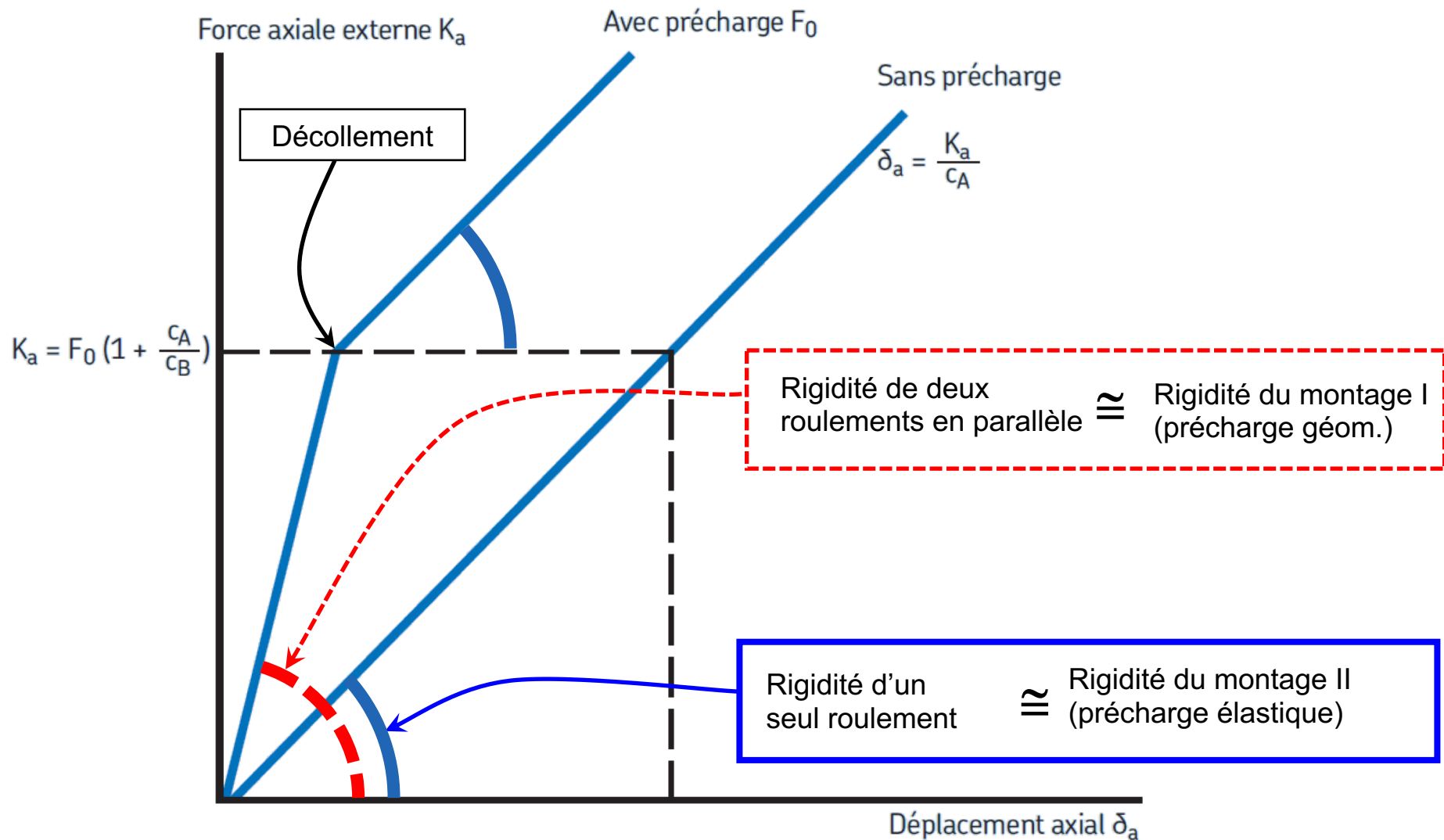


K_a : force axiale externe
appliquée au montage

F_{aA} : force axiale agissant sur
le roulement A

F_{aB} : force axiale agissant sur
le roulement B

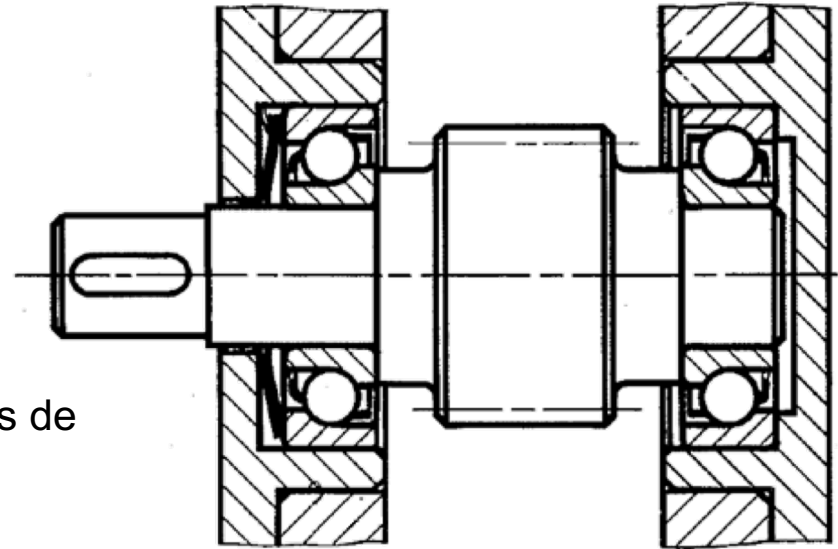
Comparaison de la rigidité axiale des montages de type I et II



Intérêt du montage de type II (comparé au I) en microtechnique

Avantages:

- Construction et montage plus simples
- 2 roulements suffisent pour réaliser le palier
- Contrôle précis de la précharge (faibles couples de frottement)
- Peu sensible aux dilatations thermiques
- Ce même montage peut être réalisé avec des roulements à gorges profondes

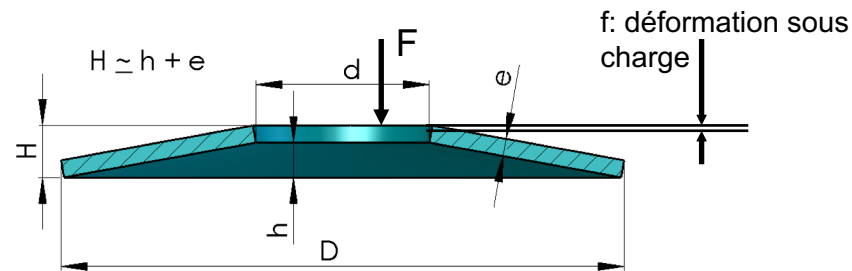


Inconvénient:

- Rigidité axiale environ 2 fois inférieure au *montage I*

Éléments élastiques utilisés pour générer la force de précharge

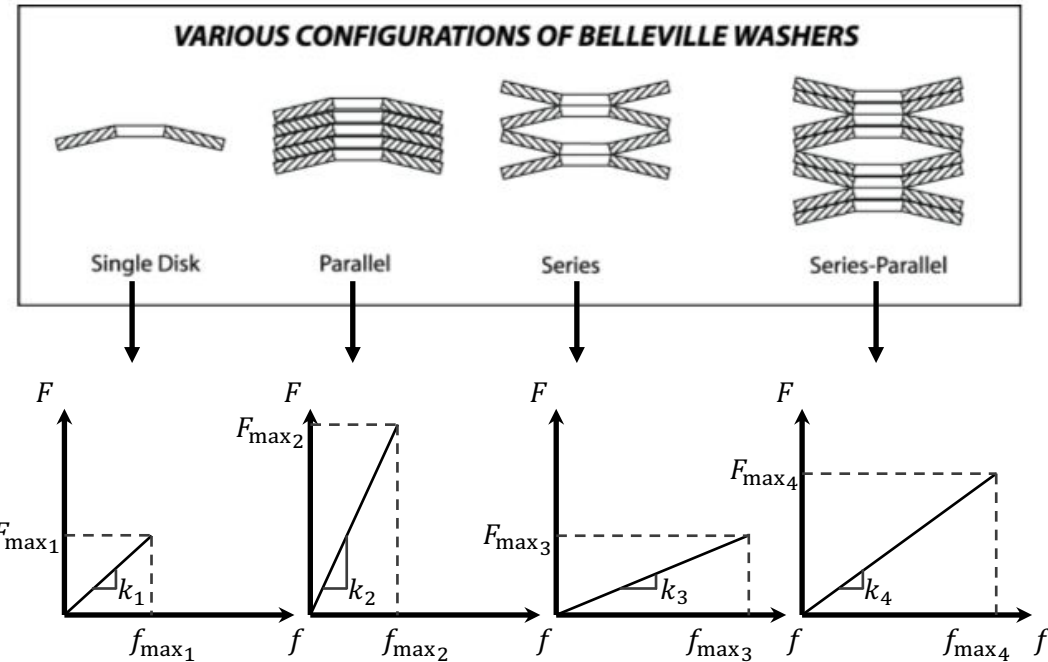
Rondelle *Belleville*



Rondelle ondulée



Ressort hélicoïdal de compression



$$k_2 = 4 k_1$$

$$f_{\max 2} = f_{\max 1}$$

$$F_{\max 2} = 4 F_{\max 1}$$

Même course
Plus de force

$$k_3 = \frac{1}{4} k_1$$

$$f_{\max 3} = 4 f_{\max 1}$$

$$F_{\max 3} = F_{\max 1}$$

Plus de course
Même force

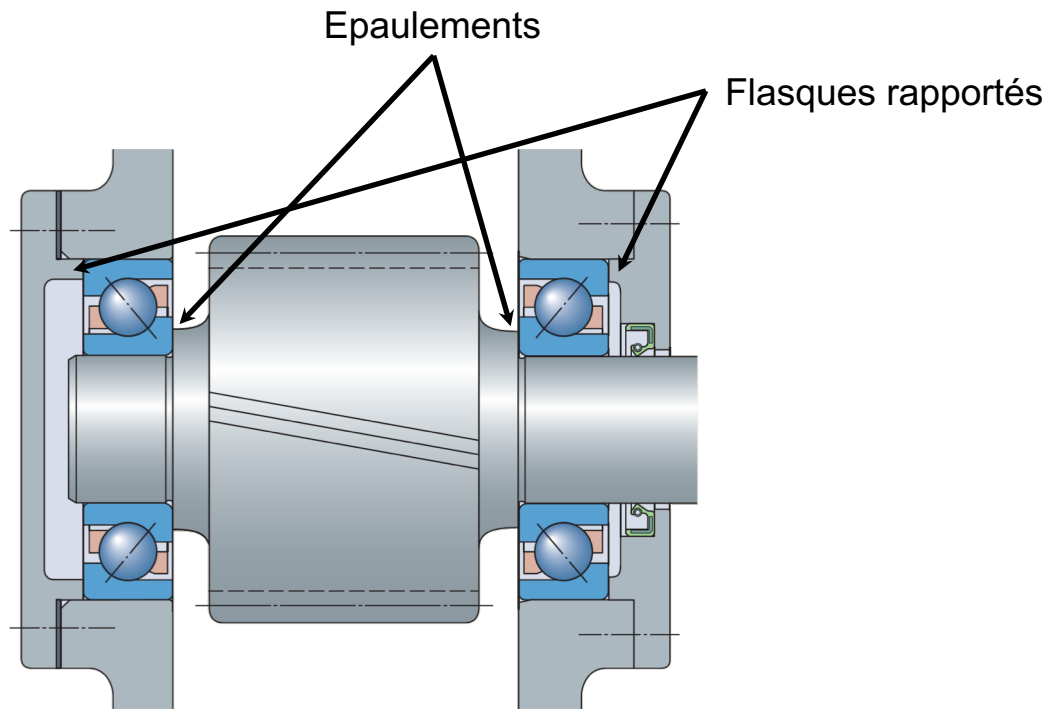
$$k_4 = \frac{1}{2} k_1$$

$$f_{\max 4} = 4 f_{\max 1}$$

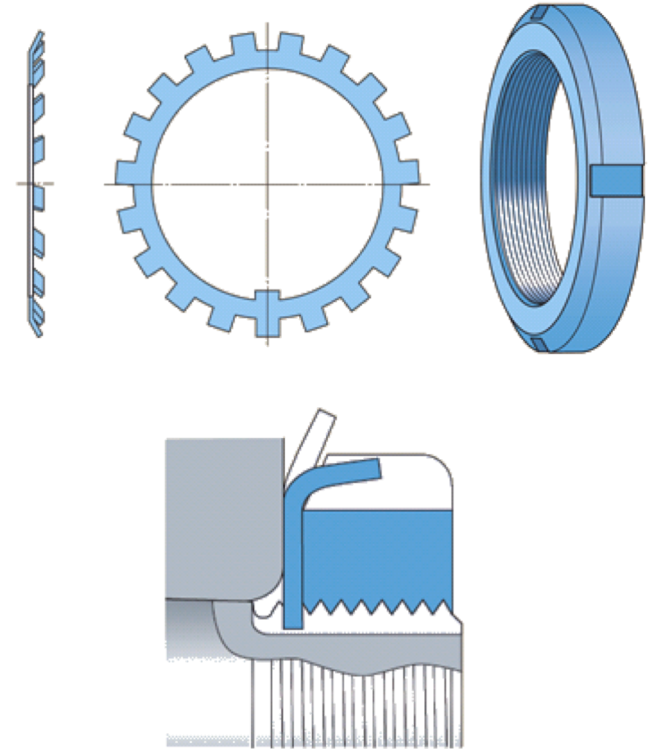
$$F_{\max 4} = 2 F_{\max 1}$$

Plus de course
Plus de force

Appui/serrage axial des bagues

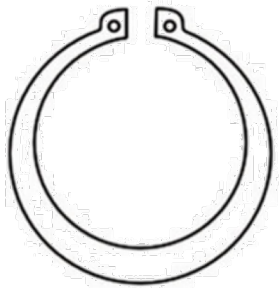


Ecrou de serrage avec rondelle-frein

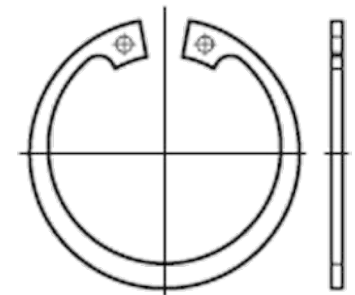


Extérieure (pour arbre)

Bagues d'arrêt élastiques



Intérieure (pour logement)



Guide de conception des montages préchargés élastiquement

1. Définir le type de montage: "en O" ou "en X"

En fonction de la rigidité angulaire ou du rotulage admissible désiré

- O: éloigner au maximum les centres de pivotement
- X: rapprocher, voire faire coïncider les centres de pivotement

2. Déterminer le sens de la précharge sur les bagues

- Déterminer où sont les points de contact entre les billes et les bagues
- Attention à monter les bagues des roulements à contact oblique dans le bon sens

3. Déterminer les ajustements des bagues

- Avec jeu ou avec serrage

4. Déterminer dans quel sens est la charge axiale externe (s'il y en a une)

5. Placer l'élément élastique de précharge

- Doit agir sur les bagues ajustées avec jeu
- Eviter de faire transiter la charge axiale externe par l'élément élastique de précharge

6. Placer les appuis axiaux

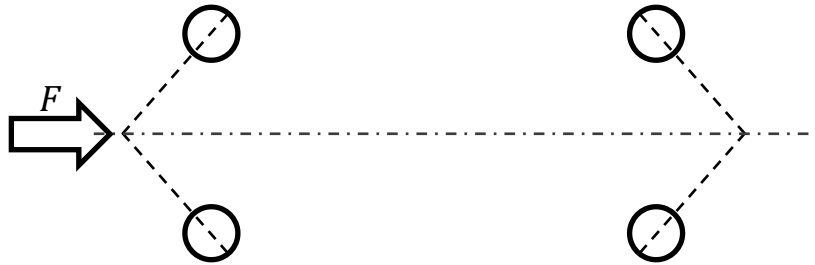
- Etablir la boucle de force interne: actions, réactions
- Permettre le libre déplacement des bagues ajustées avec jeu sous l'effet de la précharge

7. Placer les arrêts axiaux de sécurité

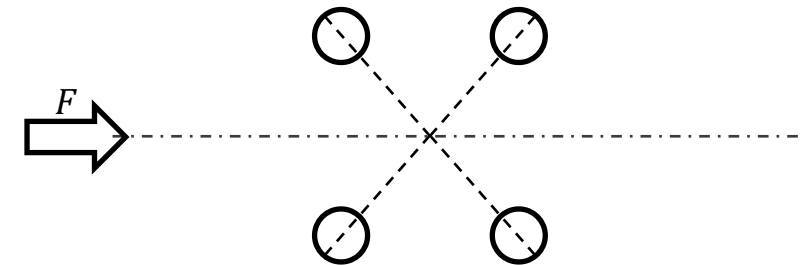
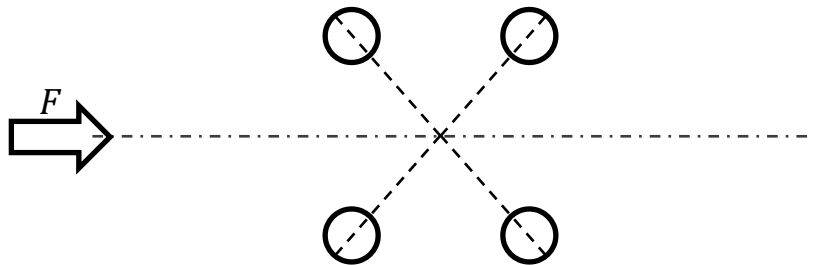
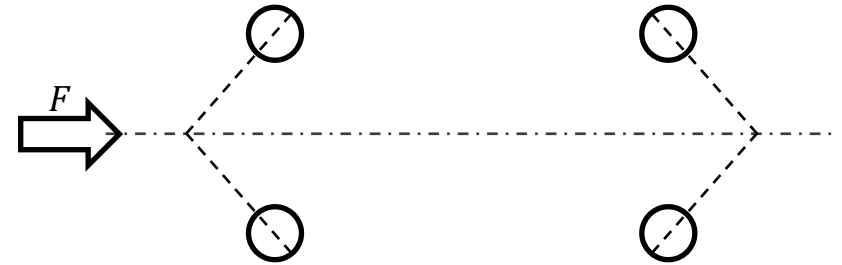
- Uniquement sur les bagues ajustées avec serrage

Exemples de montage de type II: précharge élastique (fait en classe)

Bagues intérieures ajustées avec serrage



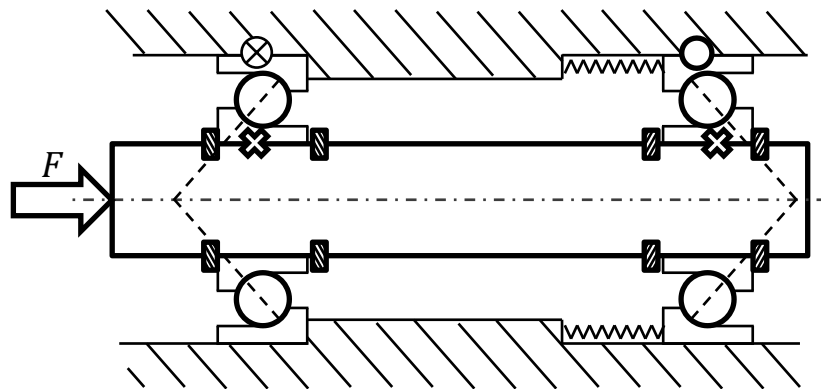
Bagues extérieures ajustées avec serrage



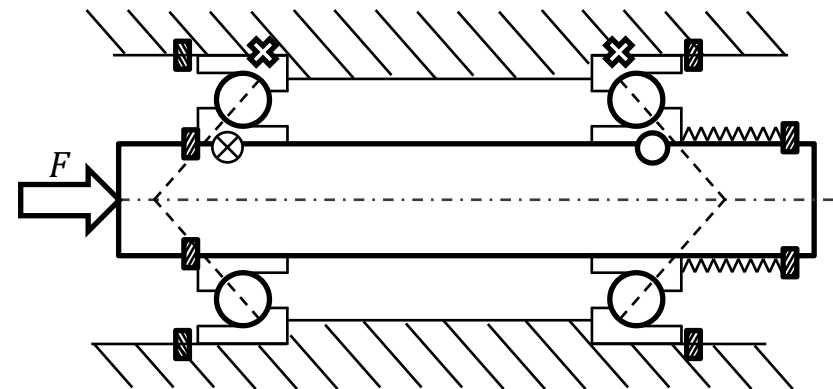
← montage
En «O»: rotulage pas désiré
En «X»: rotulage désiré

Exemples de montage de type II: précharge élastique

Bagues intérieures ajustées avec serrage



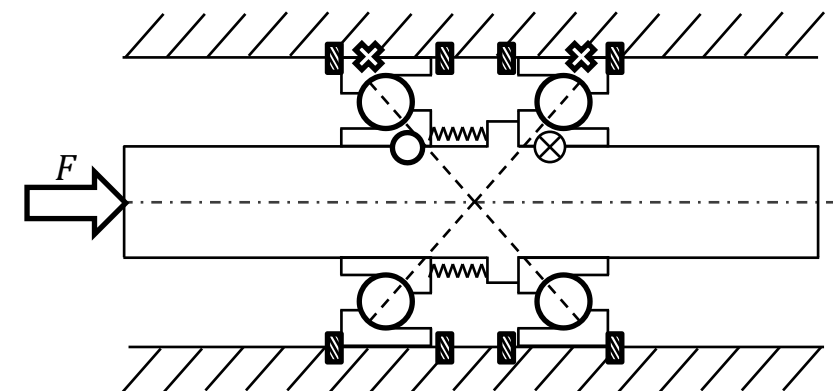
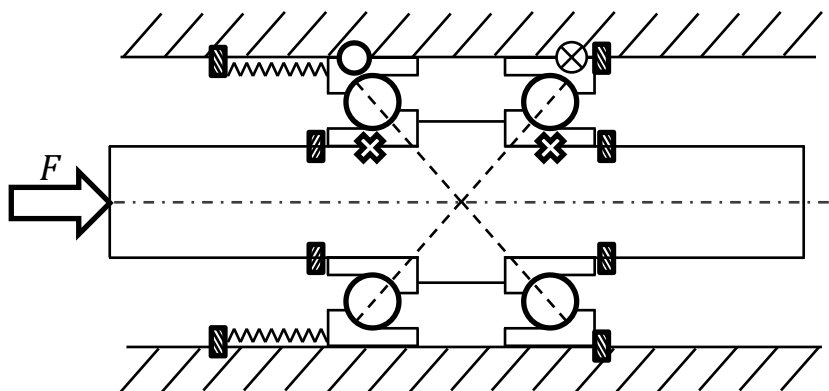
Bagues extérieures ajustées avec serrage



⊗ Jeu possible

○ Jeu obligatoire

⊗ Serrage



montage
←
En «O»: rotulage pas désiré

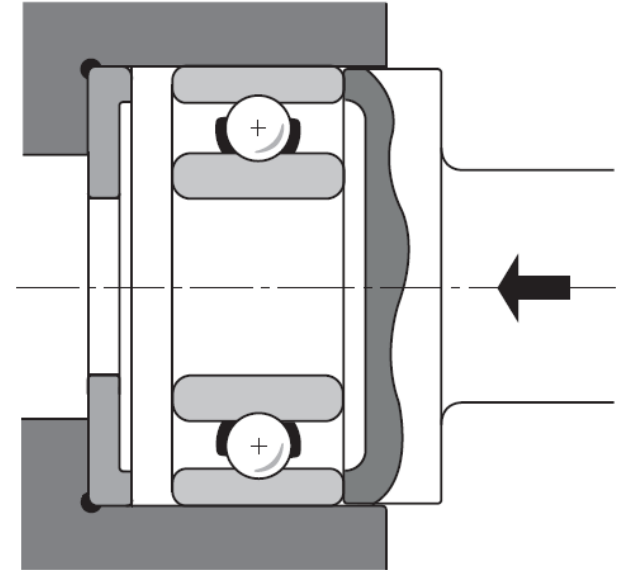
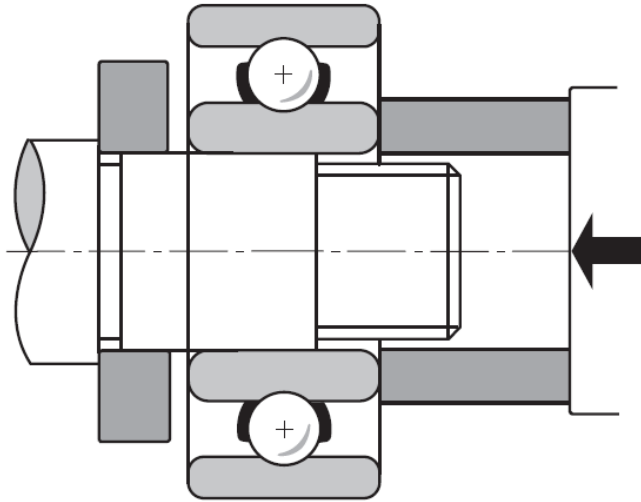
En «X»: rotulage désiré

Montage et démontage

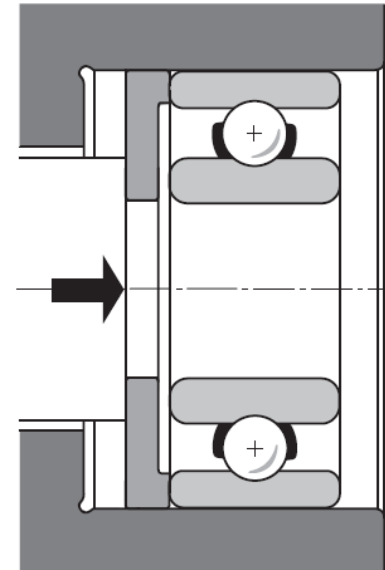
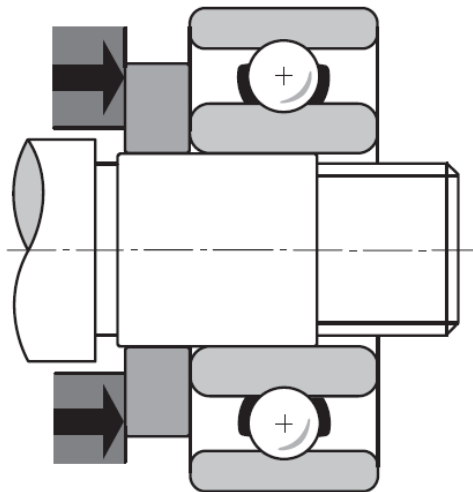
Bague intérieure ajustée avec serrage

Bague extérieure ajustée avec serrage

Montage



Démontage



Tolérances

Exemple pour J7

Jeu maximum / Serrage minimum

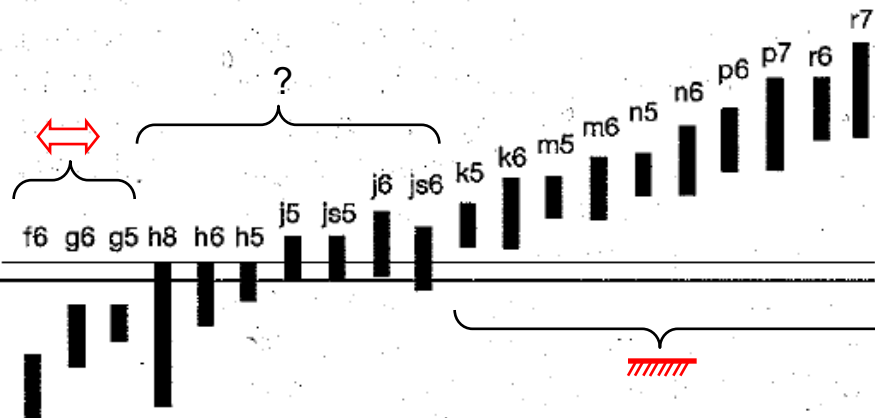
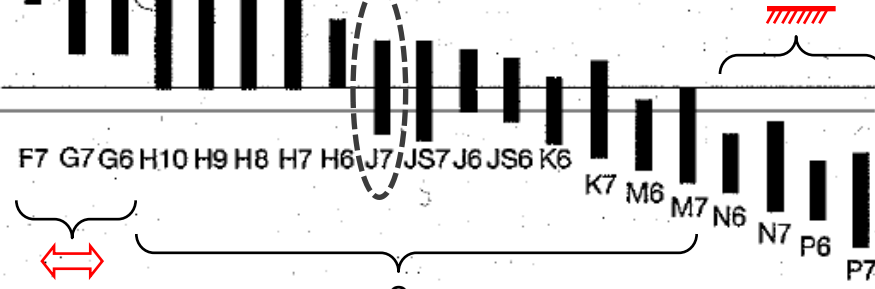
Serrage maximum / Jeu minimum

Tolérances normées du roulement

Bague extérieure

Bague intérieure

Tolérance du logement dans lequel s'insère le roulement



Tolérance de l'arbre sur lequel se monte le roulement

↔ Jeu garanti

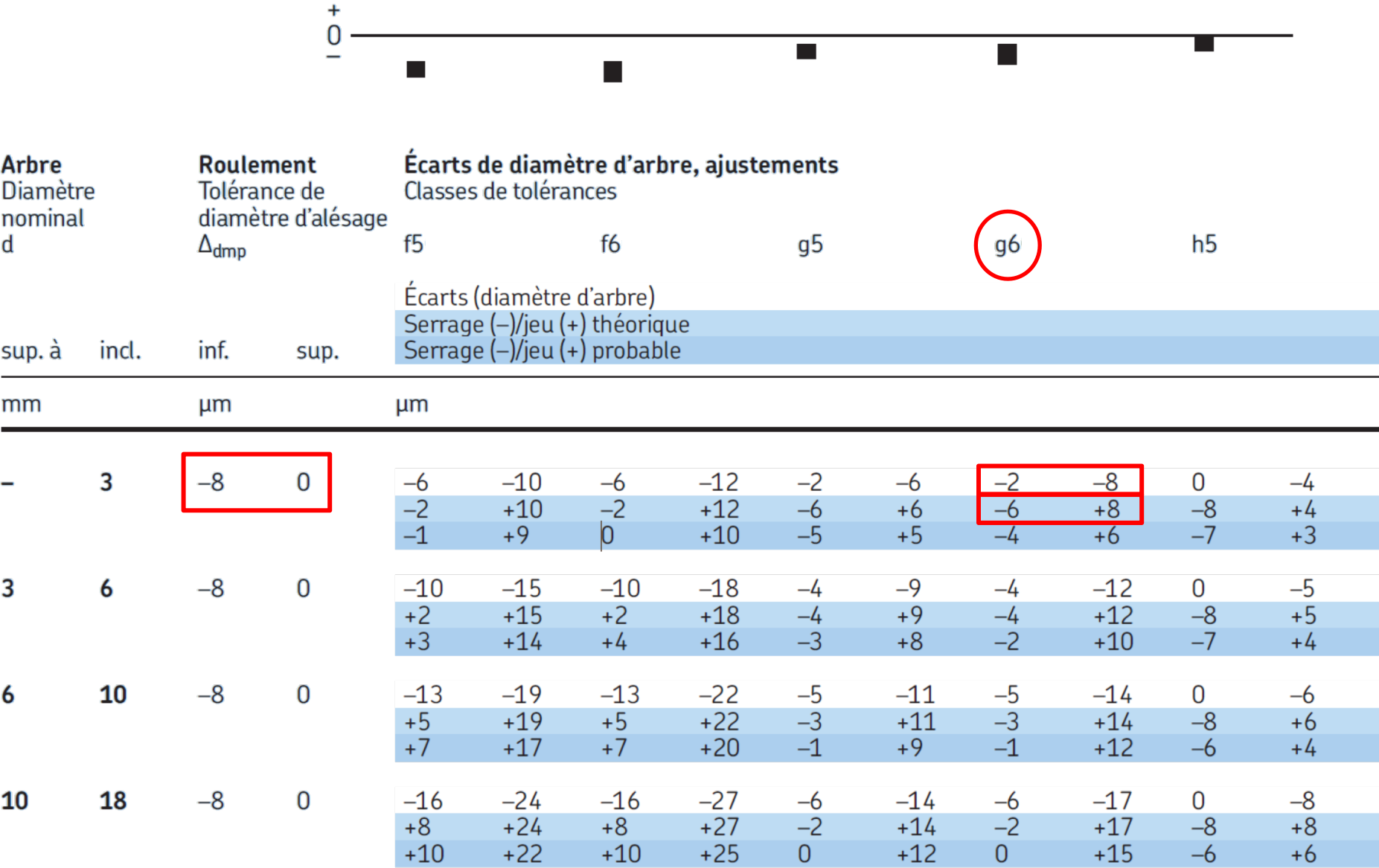
? Ajustement incertain

▨ Serrage garanti

Axe du roulement

Exemple de tolérances

Tolérances d'arbre et ajustements



Classes de tolérances pour arbre

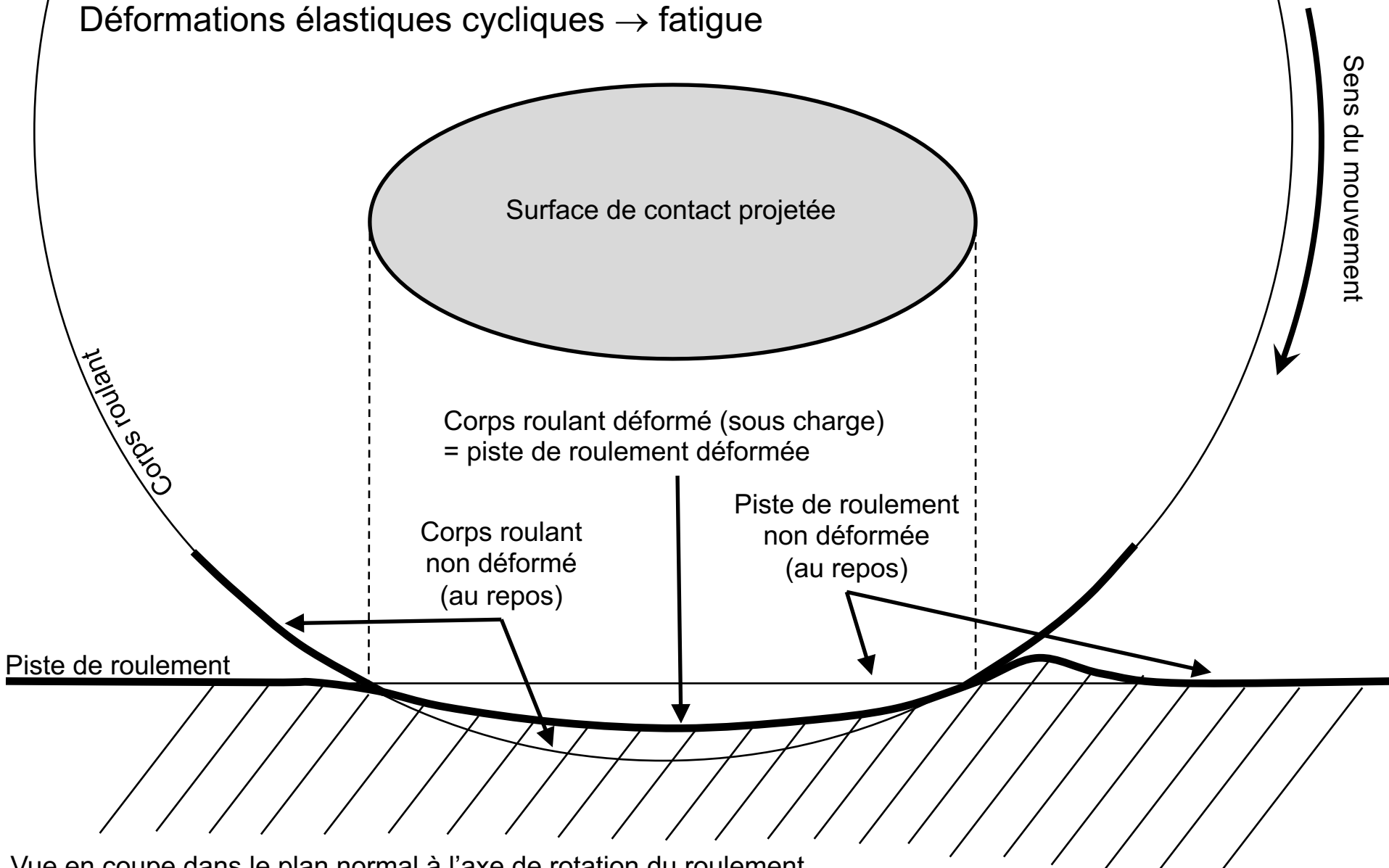
Conditions d'utilisation		Exemples	Diamètre de l'arbre en mm				Classe de tolérance
Charge fixe sur bague intérieure ²⁾	La bague intérieure doit pouvoir coulisser facilement sur l'arbre	Roues sur axe immobile (roues folles)	Tous diamètres				g6
	La bague intérieure ne doit pas nécessairement pouvoir coulisser sur l'arbre	Galets tendeurs, poulies à câbles					h6
Charge tournante sur bague intérieure ³⁾ ou direction de charge indéterminée	Charges faibles et variables	Rouleaux-transporteurs, roulements peu chargés de réducteurs	—	jusqu'à 50	—	—	js5
			au-dessus de 18 jusqu'à 100	—	jusqu'à 40	—	js6
			au-dessus de 100 jusqu'à 140	—	au-dessus de 40 jusqu'à 100	—	k6
	Charges normales et grandes	Mécanique générale, moteurs électriques, turbines, pompes, moteurs à combustion interne, réducteurs à engrenages, machines à bois	jusqu'à 18	—	—	—	js5
			au-dessus de 18 jusqu'à 100	jusqu'à 50	jusqu'à 40	jusqu'à 40	k5
			au-dessus de 100 jusqu'à 140	au-dessus de 50 jusqu'à 150	au-dessus de 40 jusqu'à 100	au-dessus de 40 jusqu'à 65	m5
			au-dessus de 140 jusqu'à 200	au-dessus de 150	au-dessus de 100 jusqu'à 140	au-dessus de 65 jusqu'à 100	m6
	Très grandes charges et chocs	Boîtes d'essieux pour véhicules sur rails, moteurs de traction, laminoirs	—	au-dessus de 50 jusqu'à 150	au-dessus de 50 jusqu'à 140	au-dessus de 50 jusqu'à 100	n6
			—	—	au-dessus de 140 jusqu'à 200	au-dessus de 100 jusqu'à 140	p6

Classes de tolérances pour logement

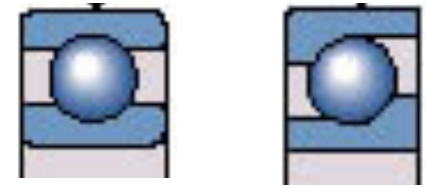
Conditions d'utilisation			Exemples	Classe de tolérance ¹⁾	Remarques
Logements en une pièce ¹⁾	Charge tournante sur bague extérieure ²⁾	Roulements fortement chargés montés dans des logements à parois minces, chocs importants	Moyeux de roues avec roulements à rouleaux, têtes de bielles	P7	La bague extérieure ne peut pas coulisser
		Charges normales et grandes	Moyeux de roues avec roulements à billes, têtes de bielles, roues porteuses de grues	N7	
		Charges faibles et variables	Rouleaux de transport, galets tendeurs de courroies, poulies à câble	M7	
	Direction de charge indéterminée	Chocs importants	Moteurs de traction	M7	La bague extérieure ne peut, en général, pas coulisser
		Charges normales et grandes	Moteurs électriques, pompes, paliers principaux de vilebrequin	K7	
Logements en une ou deux pièces	Direction de charge indéterminée	Charges normales et faibles	Machines électriques de grandeur moyenne, pompes, paliers de vilebrequin	JS7	La bague extérieure peut, en général, coulisser
	Charge fixe sur bague extérieure ³⁾	Charges quelconques	Mécanique générale, boîtes d'essieux pour véhicules sur rails	H7	La bague extérieure peut coulisser facilement
		Charges normales et faibles en condition d'utilisation simples	Transmissions	H8	

Mécanisme d'usure

Déformations élastiques cycliques → fatigue



Dimensionnement des r. à billes à gorges profondes et des r. à billes à contact oblique



Charges **statiques**: coefficient de sécurité S_0 {

Peu de chocs $\rightarrow S_0 \geq 0.5$
 Normal $\rightarrow S_0 \geq 1$
 Chocs importants $\rightarrow S_0 \geq 4$

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

Charge statique de base [N] (selon catalogue fabricant)

Charge statique équivalente [N] (à calculer selon le cas de charge réelle)

Charges **dynamiques**: durée de vie nominale (90% de fiabilité) L_{10}

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^3$$

Charge dynamique de base [N] (selon catalogue fabricant)

Charge dynamique équivalente [N] (à calculer selon cas de charge réel)

Durée de vie en millions de tours [10^6 tours]

Durée de vie pour d'autres pourcentages de fiabilité

Fiabilité	Durée de vie en millions de tours
↓	↓
90%:	L_{10}
95%:	$L_5 = 0.62 L_{10}$
96%:	$L_4 = 0.53 L_{10}$
97%:	$L_3 = 0.44 L_{10}$
98%:	$L_2 = 0.33 L_{10}$
99%:	$L_1 = 0.21 L_{10}$

Durée de vie en heures

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} \cdot L_{10}$$

Durée de vie en heures

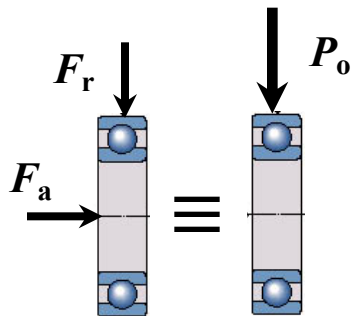
Durée de vie en millions de tours [10^6 tours]

Vitesse de rotation en tours/minute



Calcul des charges équivalentes: roulements à gorges profondes

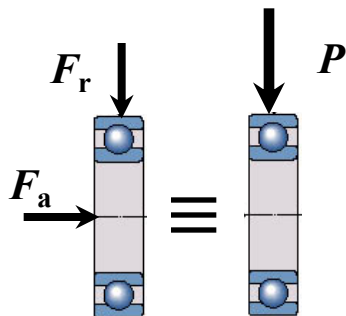
Charges statiques



Si $0.6 \cdot F_r + 0.5 \cdot F_a \geq Fr$ alors $P_0 = 0.6 \cdot F_r + 0.5 \cdot F_a$

Si $0.6 \cdot F_r + 0.5 \cdot F_a < Fr$ alors $P_0 = Fr$

Charges dynamiques



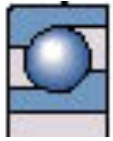
Si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors

Si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors

selon catalogue fabricant

$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$

$P = F_r$



Calcul des charges équivalentes: r. à billes à contact oblique INDIVIDUEL

Charges statiques

Charge radiale au niveau des centres de pivotement du roulement

Lorsque $0.5 \cdot F_r + 0.26 \cdot F_a \geq Fr$ alors $P_0 = 0.5 \cdot F_r + 0.26 \cdot F_a$

Lorsque $0.5 \cdot F_r + 0.26 \cdot F_a < Fr$ alors $P_0 = F_r$

Charge axiale calculée selon méthode SKF

Charges dynamiques

Charge radiale au niveau des centres de pivotement du roulement

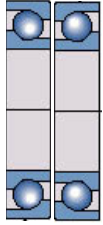
Lorsque $\frac{F_a}{F_r} > 1.14$ alors $P = 0.35 \cdot F_r + 0.57 \cdot F_a$

Lorsque $\frac{F_a}{F_r} \leq 1.14$ alors $P = F_r$

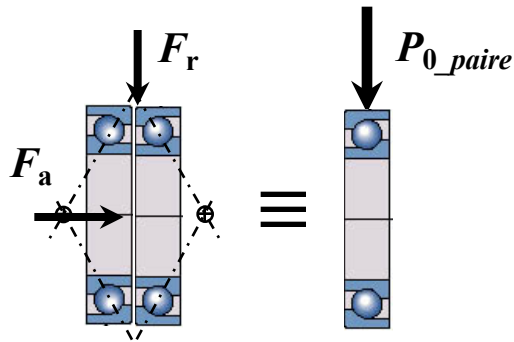
Charge axiale calculée selon méthode SKF

Calcul des charges équivalentes: PAIRE de r. à billes à contact oblique

Valable pour les montages en O et en X



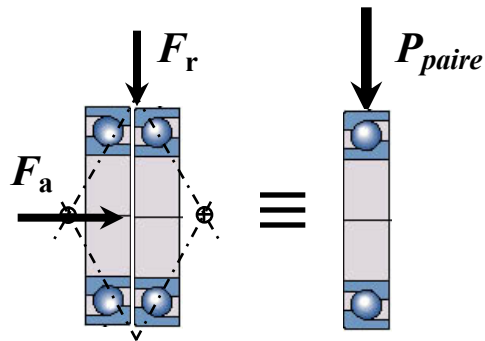
Charges statiques



$$P_{0_paire} = F_r + 0.52 \cdot F_a$$

$$C_{0_paire} = 2 \cdot C_0$$

Charges dynamiques



Lorsque $\frac{F_a}{F_r} > 1.14$ alors $P_{paire} = 0.57 \cdot F_r + 0.93 \cdot F_a$

Lorsque $\frac{F_a}{F_r} \leq 1.14$ alors $P_{paire} = F_r + 0.55 \cdot F_a$

$$C_{paire} = 1.62 \cdot C$$