

Introduction :

Un guidage des arbres en rotation entre deux pièces doit assurer les fonctions suivantes :

- positionner les deux pièces et autoriser une rotation entre elles autour d'un axe ;
- transmettre les efforts ;
- résister et s'adapter au milieu environnant ;
- être d'un encombrement minimal ;
- assurer un fonctionnement silencieux.

L'exemple de l'alternateur décrit ces différentes fonctions pour le guidage du rotor. Le choix d'une solution constructive associée à un guidage en translation se fonde sur les indicateurs de qualité suivants :

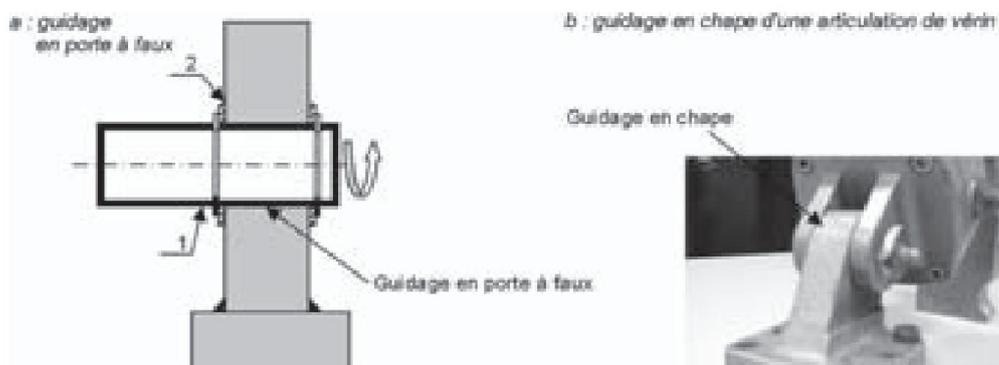
- degré de précision et encombrement ;
- puissance transmissible et température de fonctionnement ;
- rendement mécanique, durée de vie et fiabilité ;
- entretien ;
- coût.

Les différents principes et moyens mis en œuvre

Différents types de guidages en rotation existent :

- guidage en rotation par contact direct entre surfaces ;
- guidage en rotation par interposition de bagues de frottement ;
- guidage en rotation par interposition d'éléments roulants.

Le guidage en rotation par contact direct peut être obtenu à partir du contact entre des surfaces cylindriques complémentaires et de deux arrêts qui suppriment le degré liberté en translation suivant l'axe des cylindres. Il existe deux distributions principales de la géométrie du contact : l'une dite en porte à faux et l'autre appelée chape. Le guidage en rotation peut également être obtenu à partir du contact direct entre deux surfaces coniques complémentaires d'angle d'inclinaison suffisant pour éviter le coincement.



Avantages et inconvénients

D'un coût peu élevé, le guidage par contact direct entre surfaces a pour conséquence des résistances passives importantes qui limitent ses possibilités d'utilisation à de faibles

vitesses et à des efforts transmissibles modérés. Dans le cas contraire, un échauffement important se produirait.

La détermination des caractéristiques d'un guidage par contact direct entre surfaces s'appuie sur :

- la pression maximale admissible ;
- le comportement thermique ;
- la durée de vie souhaitée.

Guidage en rotation obtenu par interposition de bagues de frottement

L'interposition de bagues de frottement entre les pièces qui font l'objet d'un guidage en rotation permet d'atteindre des performances bien supérieures à celles obtenues avec un contact direct entre surfaces :

- réduction du coefficient de frottement ;
- augmentation de la durée de vie, fonctionnement silencieux ;
- report de l'usure sur les bagues.

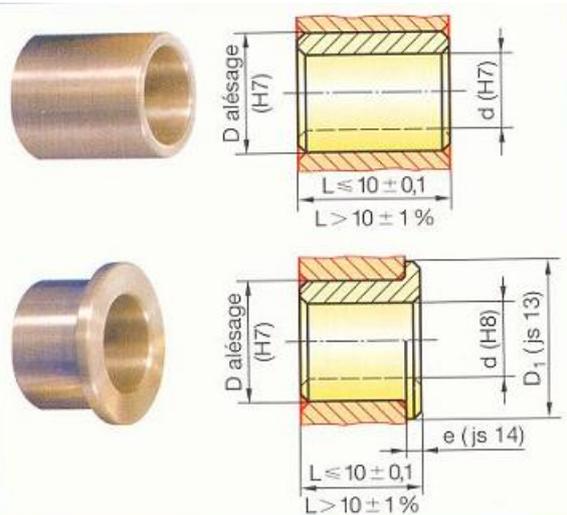
Les principaux types de bagues de frottement utilisées pour assurer un guidage en rotation peuvent être classés en deux catégories : les coussinets et les bagues en tôle roulée. Outre ces deux solutions, on peut placer dans la catégorie « bagues de frottement » les articulations sphériques qui s'utilisent par paire.

Coussinets frittés :

Les coussinets sont réalisés à partir de différents types de matériaux : bronze, matières plastiques (Nylon, Teflon), etc. Ils peuvent être utilisés à sec ou lubrifiés. Les coussinets autolubrifiants sont obtenus à partir d'un métal fritté (poudre comprimée et chauffée en atmosphère contrôlée) dont la porosité varie entre 10 % et 30 % du volume du coussinet.

Coussinets cylindriques									
d	D	L			d	D	L		
2	5	2-3			18	24	18-22-28-36		
4	8	4-8-12			20	26	16-20-25-32		
5	9	4-5-8			22	28	18-22-28-36		
6	10	6-10-12-16			25	32	20-25-32-40		
8	12	8-12-16-20			28	36	22-28-36-45		
10	16	10-16-20-25			30	38	24-30-38		
12	18	12-16-20-25			32	40	20-25-32-40-50		
14	20	14-18-22-28			35	45	25-35-40-50		
15	21	16-20-25-32			40	50	25-32-40-50		
16	22	16-20-25-32			45	55	35-45-55-65		

Coussinets à collerette									
d	D	D ₁	e	L	d	D	D ₁	e	L
3	6	9	1,5	4-6-10	20	26	32	3	16-20-25-32
4	8	12	2	4-8-12	22	28	34	3	15-20-25-30
6	10	14	2	6-10-16	25	32	39	3,5	20-27-32
8	12	16	2	8-12-16	28	36	44	4	22-28-36
10	16	22	2	8-10-16	30	38	46	4	20-25-30
12	18	24	3	8-12-20	32	40	48	4	20-25-30-32
14	20	26	3	14-18-22-28	36	45	54	4,5	22-28-36
16	22	28	3	16-20-25-32	40	50	60	5	25-32-40
18	24	30	3	18-22-28	50	60	70	5	32-40-50



Arbre	Dureté	HB ≥ 200
	Tolérance	f7
	État de surface	Ra ≤ 0,2

EXEMPLE DE DÉSIGNATION :
 Coussinet cylindrique fritté, **d × D × L** ISO 2795
 Coussinet à collerette fritté, **Cd × D × L** ISO 2795

Détermination d'un coussinet			
p	\times	v	$=$ 1,8
Pression spécifique en MPa		Vitesse linéaire d'un point de la périphérie de l'arbre en m/s.	Valeur maximale expérimentale pour les matériaux donnés.
$p = \frac{\text{Charge radiale}}{\text{Surface projetée}}$			

Exemple de détermination de la longueur L.

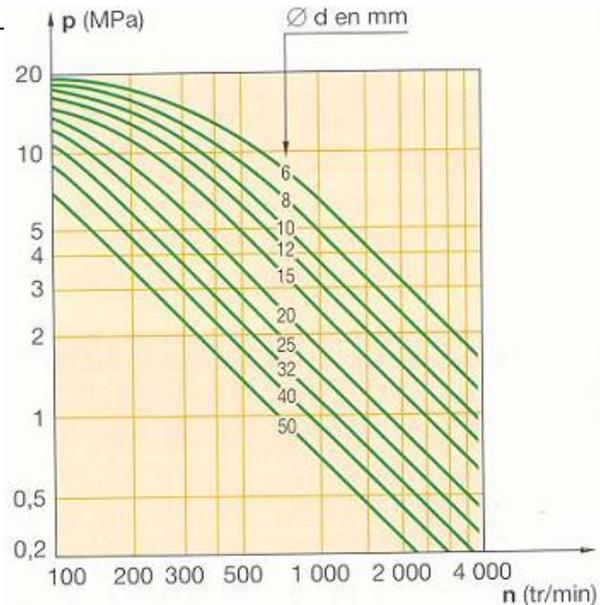
On donne la charge radiale $Q = 1\,750\text{ N}$, le diamètre de l'arbre $d = 20\text{ mm}$ et la fréquence de rotation $n = 500\text{ tr/min}$.

La lecture de l'abaque donne une pression $p \approx 3,5\text{ MPa}$.

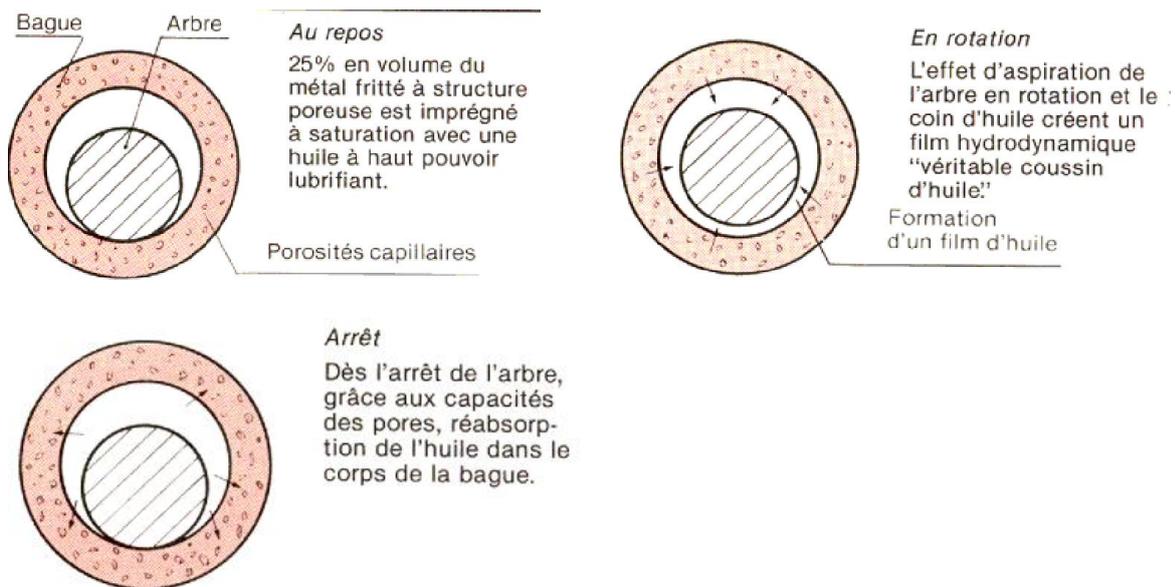
Soit $S = 1\,750/3,5 = 500\text{ mm}^2$.

On a $S = d \cdot L$, d'où longueur L du coussinet :

$L = 500/20 = 25\text{ mm}$.

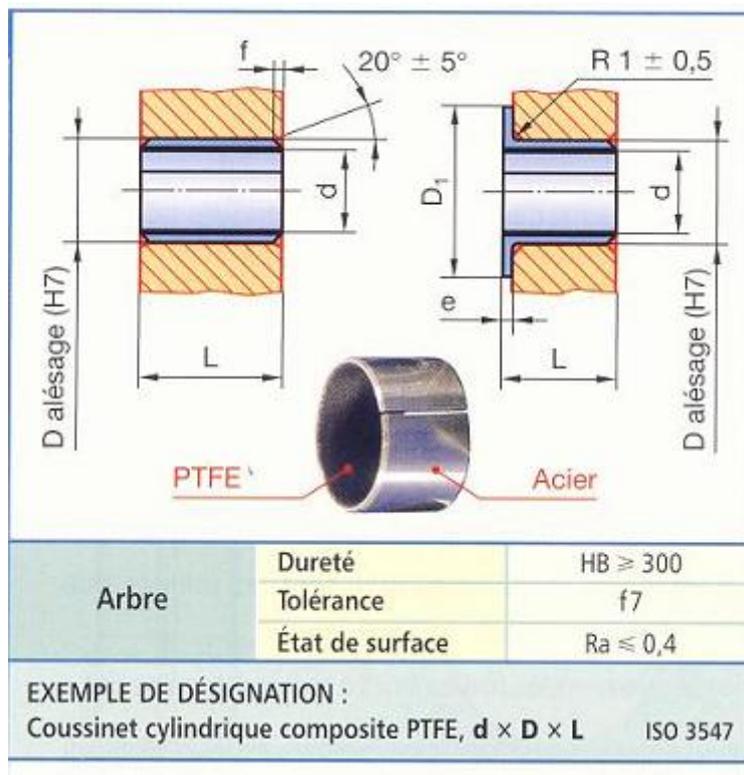


Ils sont imprégnés d'huile jusqu'à saturation, ou chargés de lubrifiant solide. Sous l'effet de la rotation de l'arbre et de l'élévation de la température, l'huile est aspirée et assure une excellente lubrification. À l'arrêt de l'arbre, du fait de la porosité du coussinet, le lubrifiant reprend sa place.



Bagues en tôle roulée (composite)

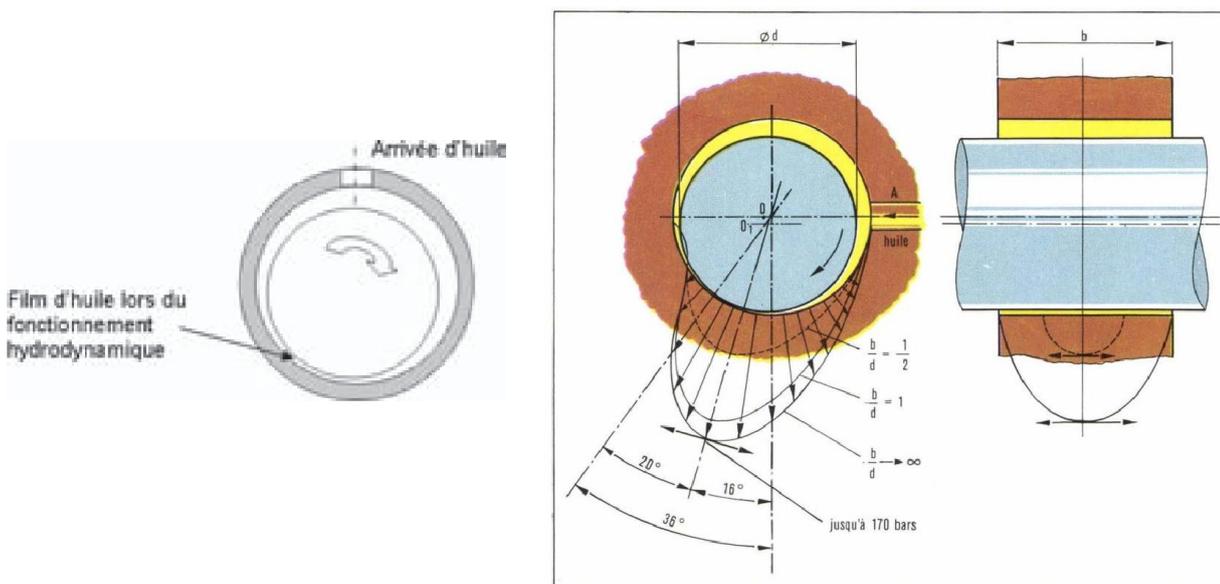
Elles sont constituées d'une tôle roulée recouverte d'une couche de bronze fritté et d'une couche de résine PTFE imprégnée de lubrifiant solide (graphite ou plomb, etc.). Le coefficient de frottement entre la résine PTFE et l'acier se situe vers 0,03 suivant les conditions de fonctionnement.



Liaison pivot obtenue par interposition d'un film d'huile :

Paliers hydrodynamiques :

Les paliers lisses hydrodynamiques sont constitués de coussinets qui comportent une rainure permettant l'arrivée d'un lubrifiant sous pression. De l'huile sous pression est envoyée dans une rainure dès que l'arbre a atteint une vitesse de rotation assez grande. Un film d'huile est alors créé : il n'y a plus de contact métal sur métal entre l'arbre et le coussinet. Ce film d'huile, dont l'épaisseur varie de 0,002 à 0,020 mm, sépare les pièces en mouvement.



La formation du film d'huile dépend :

- des conditions de fonctionnement (vitesse et pression) ;
- du lubrifiant (viscosité) ;
- de l'état des surfaces (rugosité $R_{\max} < 0,25 h_{\min}$ avec h_{\min} la hauteur du film d'huile).

En fonctionnement normal (régime hydrodynamique), il n'y a pas de contact métal sur métal entre l'arbre et le coussinet, sauf au démarrage. Le palier hydrodynamique, tout en acceptant des charges plus importantes, permet une vitesse et une durée de vie supérieures aux autres types de solutions. L'arrivée du lubrifiant doit être placée dans la zone de dépression ou de pression nulle. Dans ce type de palier hydrodynamique, le débit d'huile doit être suffisant pour compenser les fuites latérales. Le coefficient de frottement obtenu f est faible :

$$0,002 < f < 0,01$$

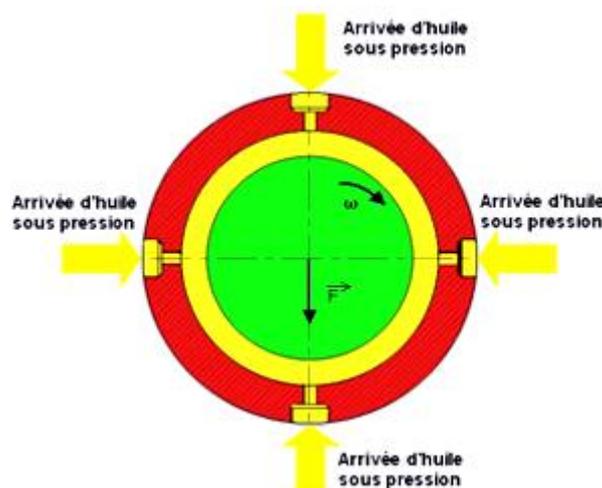
La longueur L du coussinet est telle que :

$$0,25 D < L < 0,75 D$$

Applications types : moteurs à combustion interne (paliers de vilebrequin et de bielles), paliers de turbines.

Paliers hydrostatiques

Leur principe de fonctionnement est différent de celui des paliers hydrodynamiques, il n'y a pas de formation de coin d'huile, la pression est fournie par une pompe qui envoie le fluide sous pression dans quatre chambres munies d'un étranglement constant. L'huile s'échappe par l'intermédiaire des canalisations de retour au réservoir. L'arbre est sustenté au centre du mécanisme par la pression du fluide.



Guidage en rotation réalisé par roulement :

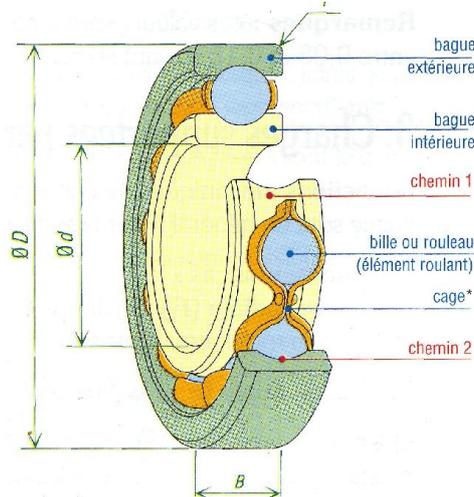
L'idée qui consiste à remplacer le glissement avec frottement par du roulement remonte à l'Antiquité. Les Égyptiens utilisèrent ce principe pour construire leurs édifices. Dès cette époque, les axes des chariots commencèrent à utiliser des sortes de roulements à rouleaux.



En 1920 la normalisation commence. La technique du roulement est aujourd'hui à maturité, elle est soumise aux normes internationales... Composants de base d'un grand nombre de machines les roulements, moins de 1 mm à plus de 7 m, sont des pièces de précision et de qualité. Plusieurs milliards en sont fabriqués chaque année, les deux tiers sont des roulements rigides à billes (à contact radial).

Principaux éléments d'un roulement.

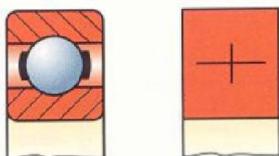
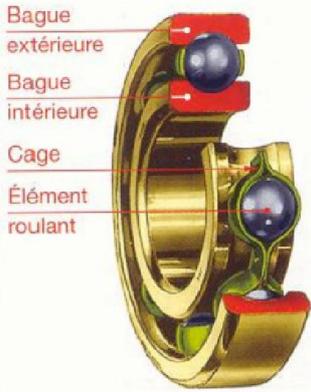
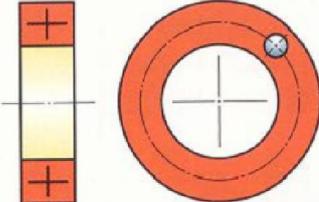
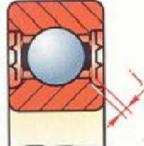
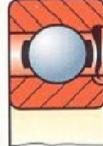
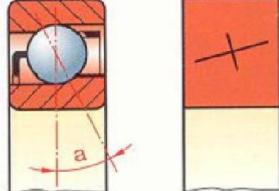
- La bague extérieure : qui se positionne dans le logement.
- La bague intérieure : qui s'ajuste sur l'arbre.
- Les éléments roulants : billes ou rouleaux de formes diverses qui roulent sur les chemins des deux bagues.
- La cage : qui maintient les éléments roulants à intervalles réguliers.

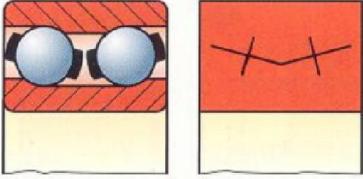
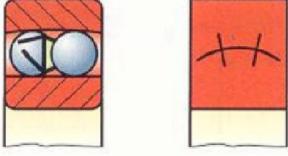
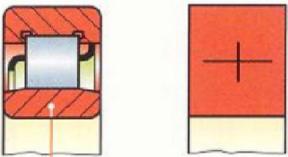
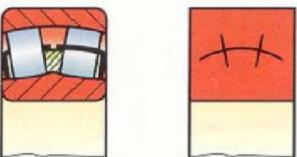
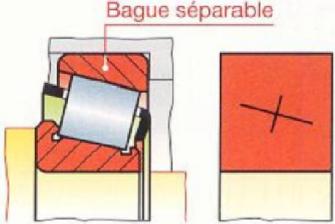


* maintien les éléments roulants à intervalles réguliers

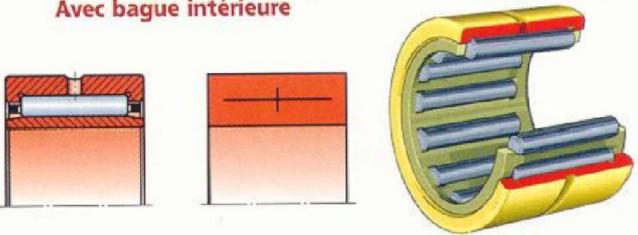
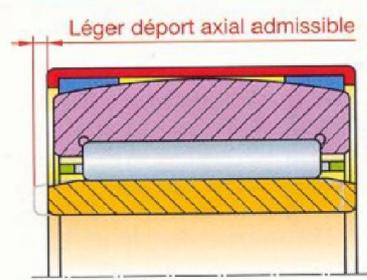
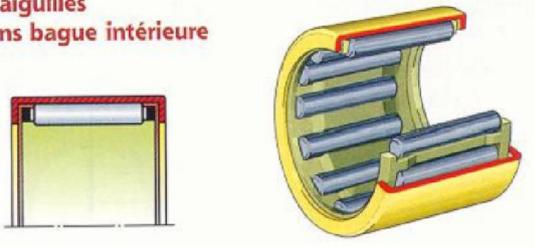
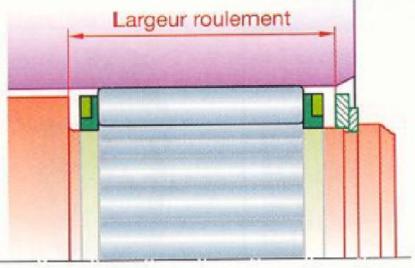
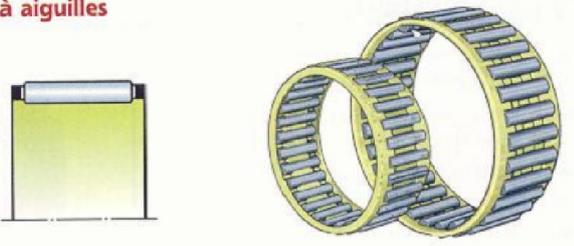
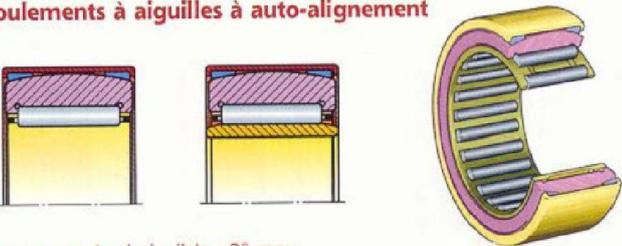
En savoir plus sur http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Roulements_Etude.htm#gO47iJMZJitkQrk8.99

Principaux types de roulements :

Roulements à une rangée de billes, à contact radial				
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges radiales et axiales relativement importantes. ■ Ils exigent une bonne coaxialité des portées de l'arbre d'une part et des alésages des logements d'autre part. ■ C'est un type de roulement très employé. 	<p>Représentations</p> <p>complète simplifiée</p> 		 <p>Bague extérieure Bague intérieure Cage Élément roulant</p>	
<p>En fonction des besoins, on utilise :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ soit une représentation simplifiée générale valable pour les types de roulement ; ■ soit une représentation simplifiée spécifique à chaque type de roulement. 			<p>Déversement admissible (rotulage) : 2' à 10'</p>	
<p>Ces roulements existent en trois variantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ avec une rainure dans la bague extérieure pour maintien par segment d'arrêt ; ■ avec protection latérale par un ou deux flasques ; ■ avec protection latérale par un ou deux joints (lubrification à vie). 	<p>Avec rainure</p> 	<p>Avec rainure et segment d'arrêt</p> 	<p>Représentation conventionnelle</p> 	
<p>Protection d'un seul côté par flasque</p> 	<p>Protection des deux côtés par flasques</p> 	<p>Protection d'un seul côté par joint</p> 	<p>Protection des deux côtés par joints</p> 	<p>Représentation simplifiée*</p> 
Roulements à une rangée de billes, à contact oblique				
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges axiales relativement élevées dans un seul sens, ou des charges axiales et radiales combinées. En général, ils ne sont pas démontables. ■ Ils conviennent pour de grandes fréquences de rotation. ■ Ils demandent une bonne coaxialité des portées. 			<p>Déversement admissible : ≈ 0.</p> 	

<p>Roulements à deux rangées de billes, à contact oblique</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges radiales assez importantes et des charges axiales alternées. ■ Les fréquences admissibles de rotation sont plus faibles que celles des roulements à une rangée de billes. ■ Ils exigent une très bonne coaxialité des portées. 		<p>Déversement admissible : ≈ 0</p> 
<p>Roulements à deux rangées de billes, à rotule dans la bague extérieure</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges radiales moyennes et des charges axiales faibles. ■ Ils conviennent pour de grandes fréquences de rotation. ■ Ils sont utilisés lorsque l'alignement précis des paliers est difficile. 		<p>Déversement admissible : $1,5^\circ$ à 3°</p> 
<p>Roulements à rouleaux cylindriques</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges radiales élevées mais aucune charge axiale. ■ Ils conviennent pour de grandes fréquences de rotation. ■ Ils exigent une très bonne coaxialité des portées. 	 <p>Bague séparable</p>	<p>Déversement admissible : $2'$</p> 
<p>Roulements à deux rangées de rouleaux, à rotule dans la bague extérieure</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges radiales très importantes et des charges radiales et axiales combinées. ■ Les fréquences admissibles de rotation sont moyennes. ■ Ils sont utilisés lorsque l'alignement des paliers est difficile. 		<p>Déversement admissible : 1° à $2,5^\circ$</p> 
<p>Roulements à rouleaux coniques*</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ces roulements supportent des charges radiales et axiales relativement importantes. ■ Ils ne conviennent pas pour les grandes fréquences de rotation. ■ Ils exigent une très bonne coaxialité des portées. ■ La bague extérieure ou « cuvette » est séparable. ■ Les cônes formés par les chemins de roulement et les rouleaux coniques ont le même sommet S situé sur l'axe du roulement. ■ Ces roulements sont habituellement utilisés par paire et montés en opposition. ■ Ils permettent de régler le jeu de fonctionnement. ■ Ils sont utilisés pour des paliers de dimensions grandes et moyennes pour des mécanismes précis fortement sollicités. 	 <p>Bague séparable</p>	<p>Déversement admissible : $2'$</p>  <p>Cône avec épaulements Ligne de charge Point d'application des charges Bague extérieure ou « cuvette » S α</p>

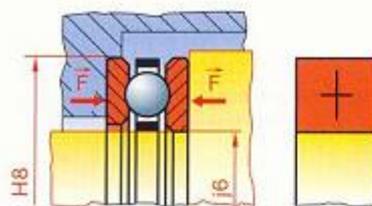
* Appelés aussi « roulements TIMKEN » du nom de leur inventeur.

Roulements à aiguilles	
<p>CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Les roulements à aiguilles supportent des charges radiales importantes sous un encombrement relativement réduit. Comme les roulements à rouleaux cylindriques comportant une bague sans épaulement ils ne supportent aucune charge axiale. ■ Ils conviennent pour de grandes fréquences de rotation. ■ Ils exigent une très bonne coaxialité des portées de l'arbre et une très bonne coaxialité des alésages des logements. ■ Ils résistent bien aux chocs. ■ Ils permettent un léger déplacement axial de l'arbre par rapport au logement. ■ La bague intérieure est séparable. ■ Ces roulements sont couramment utilisés : sans bague intérieure, sous forme de douilles à aiguilles ou de cages à aiguilles (sans bague extérieure et sans bague intérieure). L'encombrement est réduit, mais les surfaces de roulement doivent présenter une dureté et un état de surface suffisants (HRC min. = 57 ; Ra max. = 0,2). ■ Les roulements à aiguilles avec étanchéité sont lubrifiés avec une graisse au lithium. ■ Les roulements à aiguilles sont utilisés pour les paliers de petites et moyennes dimensions soumis à des charges radiales importantes. 	<p style="text-align: center;">Avec bague intérieure</p>  <p style="text-align: center;">Sans bague intérieure Avec étanchéité d'un seul côté Avec étanchéité des deux côtés</p>  <p style="text-align: center;">Déversement admissible : ≈ 0.</p>
<p>Léger déport axial admissible</p> 	<p style="text-align: center;">Douilles à aiguilles avec ou sans bague intérieure</p>  <p style="text-align: center;">Avec fond Avec étanchéité d'un seul côté Avec étanchéité des deux côtés</p> 
<p style="text-align: center;">Largeur roulement</p> 	<p style="text-align: center;">Cages à aiguilles</p> 
<p style="text-align: center;">Roulements à aiguilles à auto-alignement</p>  <p style="text-align: center;">Déversement admissible : 3° max.</p>	<p style="text-align: right; font-size: small;">Fabrication : INVA</p>

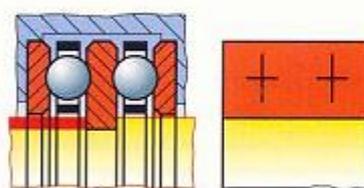
Butées à billes

- Les butées à billes ne supportent que des charges axiales relativement importantes. Les butées à simple effet ne supportent que des charges axiales dans un seul sens. Les butées à double effet sont conçues pour subir des charges axiales alternées.
- L'action de la force centrifuge sur les billes limite leur emploi à de faibles fréquences de rotation.
- Les butées à billes ne sont pas conçues pour guider un arbre en rotation. Ce guidage doit être assuré par d'autres types de roulements.
- Les butées à billes conviennent particulièrement pour des arbres verticaux, fortement chargés axialement et tournant lentement.

À simple effet



À double effet



Bagues séparables

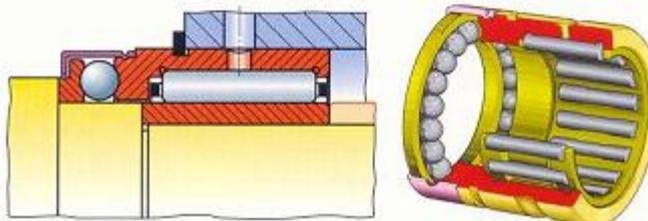
Roulements combinés à aiguilles et à billes

- Les roulements combinés à aiguilles et à billes sont utilisés pour des paliers fixes supportant des charges axiales et radiales.
- Les charges radiales sont supportées par les aiguilles et les charges axiales par les billes.
- Par rapport aux charges supportées, l'encombrement de ces roulements est très réduit.

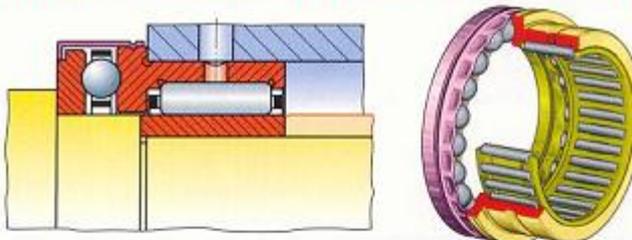
REMARQUES

- ▶ L'encombrement des roulements type NX et type NKX peut encore être réduit par suppression de la bague intérieure. Dans ce cas, les surfaces de roulement doivent présenter, outre des caractéristiques géométriques suffisantes, une dureté RHC ≥ 57 .
- ▶ Afin de pouvoir supporter des charges axiales, les roulements type NKIA et type NKIB doivent obligatoirement être utilisés avec leur bague intérieure.

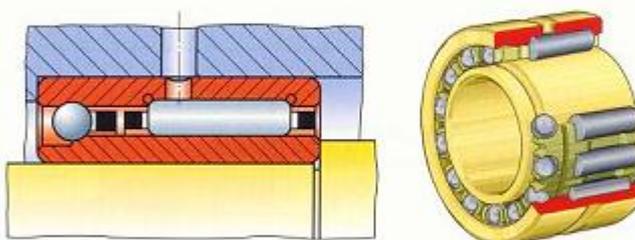
Type NX à simple effet (avec ou sans bague intérieure)



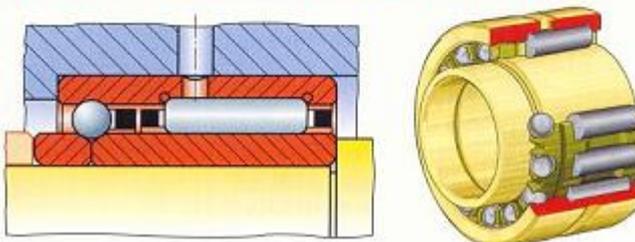
Type NKX à simple effet (avec ou sans bague intérieure)



Type NKIA à simple effet (avec bague intérieure)



Type NKIB à double effet (avec bague intérieure)

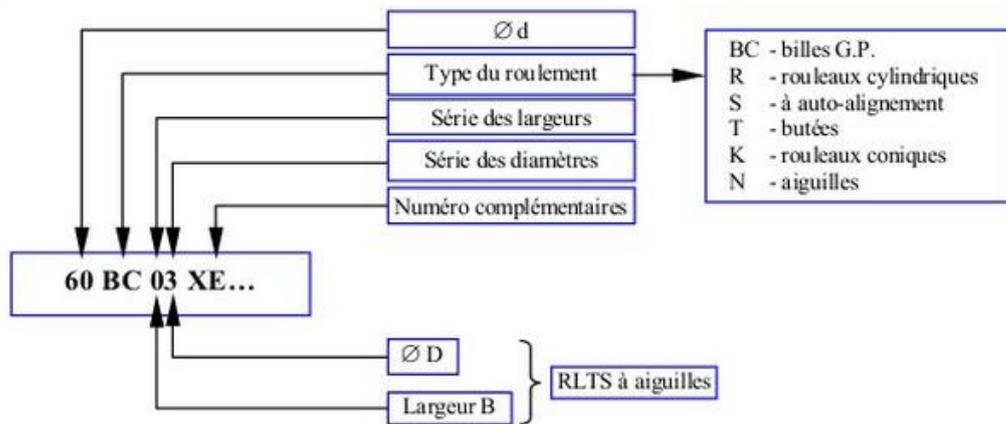


Tolérance de l'arbre pour roulement sans bague intérieure

Type	Tolérance
NX – NKX	k6
Rugosité	$Ra \leq 0,2$
Circularité	25 % de k6
Parallélisme	50 % de k6

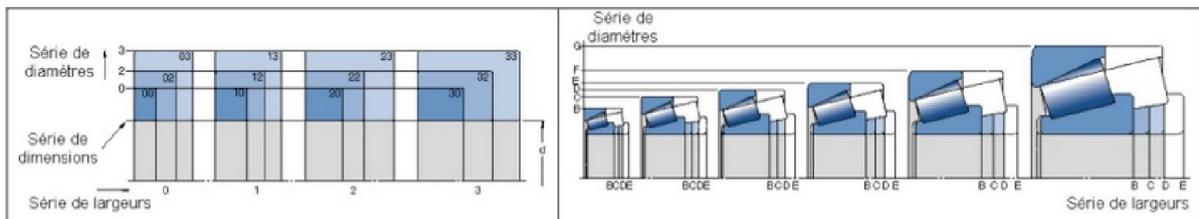
Fabrication : INA.

Désignation des roulements



Remarque : le numéro complémentaire précise les particularités : cages, flasques, joints, jeu interne, tolérances, lubrifiant, exigences spéciales... 2 ZNR = 2 flasques + rainure + segment d'arrêt.

Normalisation des dimensions : les principales dimensions normalisées sont le diamètre de l'alésage du roulement (d), le diamètre extérieur (D), la largeur (B) et le rayon de l'arrondi des bagues (r). Pour un même alésage d , plusieurs D sont possibles et inversement. Pour un même couple (ci et D), plusieurs largeurs B sont possibles (séries de largeurs : 0-1-2-3-4).



En savoir plus sur http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Roulements_Etude.htm#9d6W32oUySISJsR.99

Choix d'un type de roulement

Il est toujours judicieux d'envisager au préalable une solution utilisant les roulements les plus économiques : billes à contact radial, rouleaux cylindriques et aiguilles. À eux seuls ils représentent plus de 80 % des roulements vendus. Un roulement plus coûteux au départ peut parfois simplifier le montage, les opérations de maintenance et diminuer le coup global d'un appareil.

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...