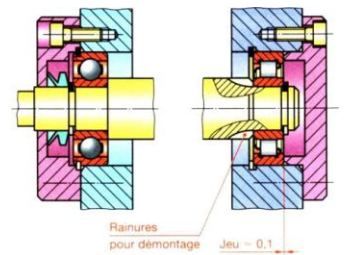
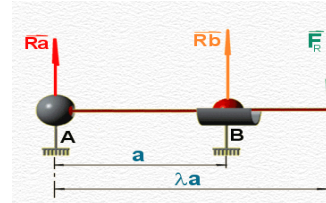


Cycle 2: Concevoir, étudier et réaliser des architectures et solutions technologiques

Chapitre 6 – Architecture de la liaison pivot – Guidage en rotation par roulements à simple rangée de billes

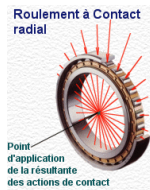
Quelles solution utilisent les industriels pour réaliser des guidages en rotation par roulements ?

Nous allons voir dans ce chapitre les différentes solutions, les contraintes de conception et de montage des roulements à simple rangée de billes. Nous allons apprendre à valider une solution par le dimensionnement (efforts, durée de vie L90...)



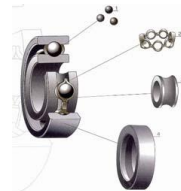
Problématique

Quelles sont les principales architectures pour le guidage en rotation avec éléments roulants ?
Comment dimensionner un montage de roulements à simple rangée de billes ?



$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^k$$

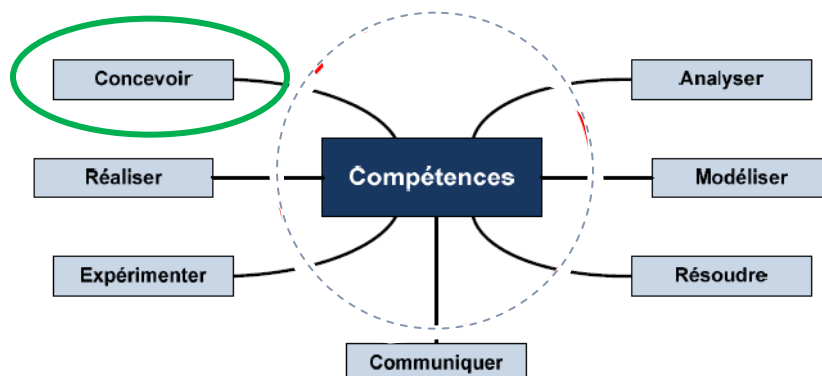
k = 3 pour les billes



Savoir

E. Concevoir:

- Proposer une architecture fonctionnelle et structurelle de guidage en rotation par roulements
- Connaître les différentes architectures de montage
- Choisir et justifier une solution d'architecture
- Dimensionner un guidage en rotation par roulements (durée de vie, efforts...)





Architecture du guidage en rotation - Roulements à simple rangée de billes

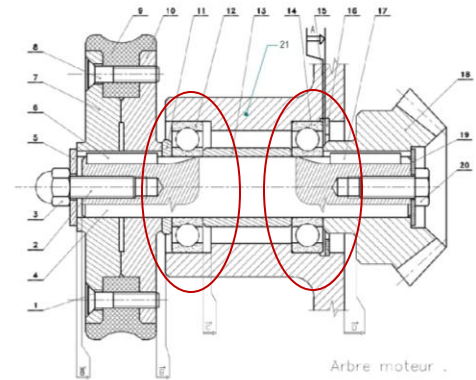
1. Introduction

Les roulements font partie intégrante de la plupart des systèmes mécaniques. Ils permettent de **d'éliminer les frottements dans une liaison pivot** ou dans une liaison glissière.

Il a plusieurs siècles et n'a pas cessé d'évoluer. Actuellement le **choix des matériaux et la qualité d'usinage** permettent d'obtenir des roulements dont la **durée de vie est « infinie »**, c'est à dire que sa durée de vie est supérieure à celle du mécanisme qui le supporte.

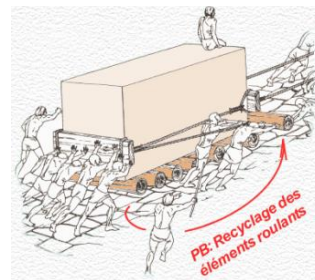
Les fabricants de roulements nous promettent des nouveaux matériaux toujours plus performants dans les années à venir avec des coûts de production toujours en diminution.

Ex : On trouve plus de 100 roulements sur une voiture haut de gamme. Les roulements industriels mesurent de quelques millimètres de diamètre à plusieurs mètres.



2. Un peu d'histoire...

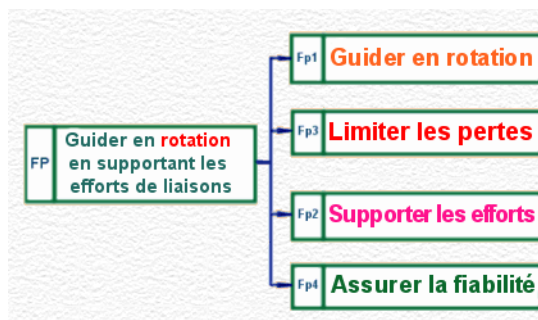
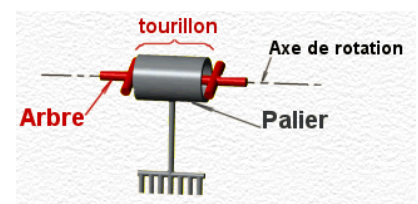
Très rapidement et en particulier chez les **Assyriens** et les **Égyptiens**, les hommes eurent recours à des **éléments roulants** afin de remplacer les traîneaux dans le transport de lourdes charges essentiellement dans les travaux de génie civil (roulement à la place du frottement de glissement). Le problème de **recyclage des éléments roulants** fût en partie résolu par les Égyptiens.



Mais ce n'est qu'au 15ème siècle que **Léonard de Vinci** théorisa la géométrie des roulements. On trouve beaucoup de descriptions détaillées de systèmes de guidages par éléments roulants dans ces écrits. Enfin, la publication des travaux de **Heinrich Hertz** sur les déformations des corps en contact contribua beaucoup à améliorer les performances des roulements.

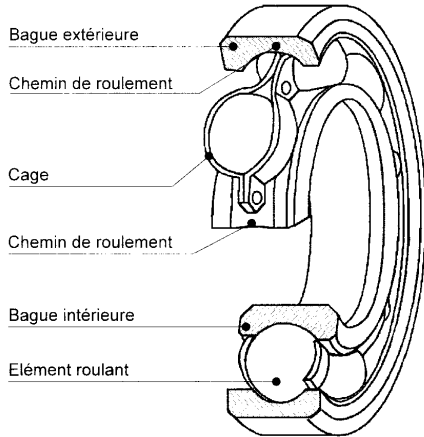
Le guidage en rotation par roulement permet d'assurer **une liaison PIVOT**.

Comme tout élément de guidage en rotation, le roulement doit **assurer les fonctions** suivantes (cf cours paliers lisses PTSI) :





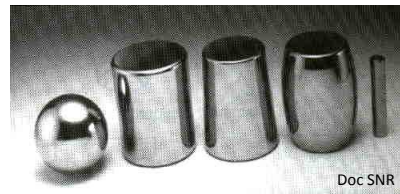
3. Le roulement à simple rangée de billes



Eléments roulants :

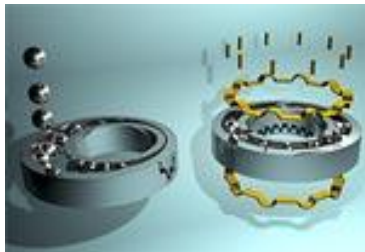
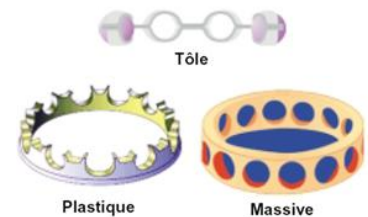
Les **billes** offrent un contact théoriquement **ponctuel** (surface de contact en fait circulaire d'après la **théorie de Hertz**) alors que les rouleaux offrent un contact théorique linéique (surface de contact en fait rectangulaire). Les **rouleaux** pourront donc accepter **des charges beaucoup plus importantes**.

Les **aiguilles** seront utilisées lorsque **l'encombrement disponible est très faible**.



La cage :

La cage assure la position relative entre les billes. C'est une pièce soumise à des **frottements importants**, elle est donc faite avec des matériaux à faible coefficient de frottement. On trouve trois types de fabrication : **plastique moulé** (PA66 chargé fibre de verre), **tôle emboutie** (acier doux ou laiton) et **cage usinée** (résine phénolique, alliage cuivreux, alliage d'aluminium).



Pour permettre la mise en position des billes dans le roulement : il faut pouvoir assembler les cages en dernier. C'est pourquoi les cages embouties et usinées sont **faites en deux parties tenues par des rivets**.

Matériau classique d'un roulement : **100C6**

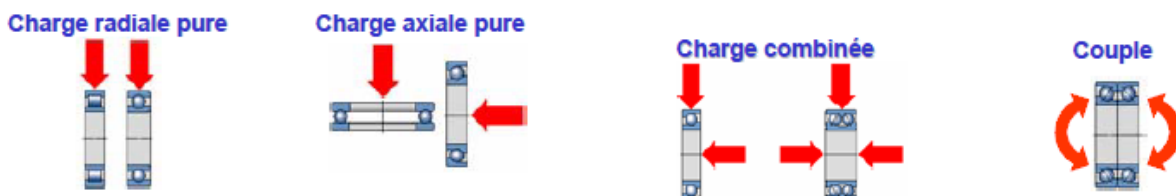
Fabrication d'un roulement : [HTTP://WWW.SNR-BEARINGS.COM/GROUP/FR/FR-FR/INDEX.CFM?PAGE=/GROUP/HOME/TECHNIQUE_ROULEMENT/FORMATION](http://www.snr-bearings.com/group/fr/fr-fr/index.cfm?page=/group/home/technique_roulement/formation)

4. Les critères de choix d'un roulement

Les critères de choix sont multiples mais on peut les résumer de la façon suivante :

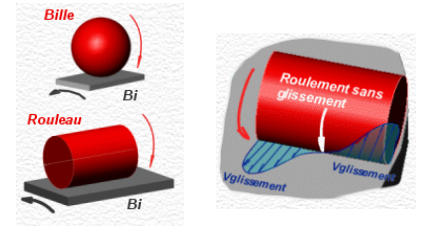
4.1. Les sollicitations : la charge et le couple

Il faut tenir compte de la valeur, la **nature de la charge (axiale, radiale ou combinée)**. Les billes acceptent des charges plus faibles que les rouleaux ou les aiguilles. Il faut aussi regarder s'il y a présence d'un **couple** sur l'arbre qui obligerait à avoir des roulements rotulés.



4.2. La fréquence de rotation

La fréquence de rotation admise par un type de roulement dépend de **la taille et la forme des éléments roulants** (ex : aiguilles = fréquences importantes), mais dépend aussi du type de cage et de la **lubrification**.

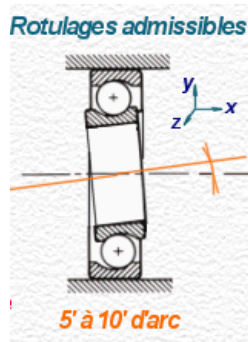


4.3. Précision du guidage

Selon le type de roulement et la nature des arrêts axiaux, il peut subsister un **jeu radial et axial** plus ou moins important. Les roulements à contacts obliques et à rouleaux coniques peuvent être montés avec **une précontrainte axiale** limitant les jeux. Sur les roulements à bille on peut avoir une légère pression axiale (petite cale) **pour limiter les vibrations et les bruits**.

4.4. Alignement des portées

Les roulements acceptent un « **angle de rotulage** » plus ou moins important, qui permet de compenser un défaut d'alignement des portées et éventuellement une légère flexion de l'arbre. Si défauts importants = roulements à rotules.



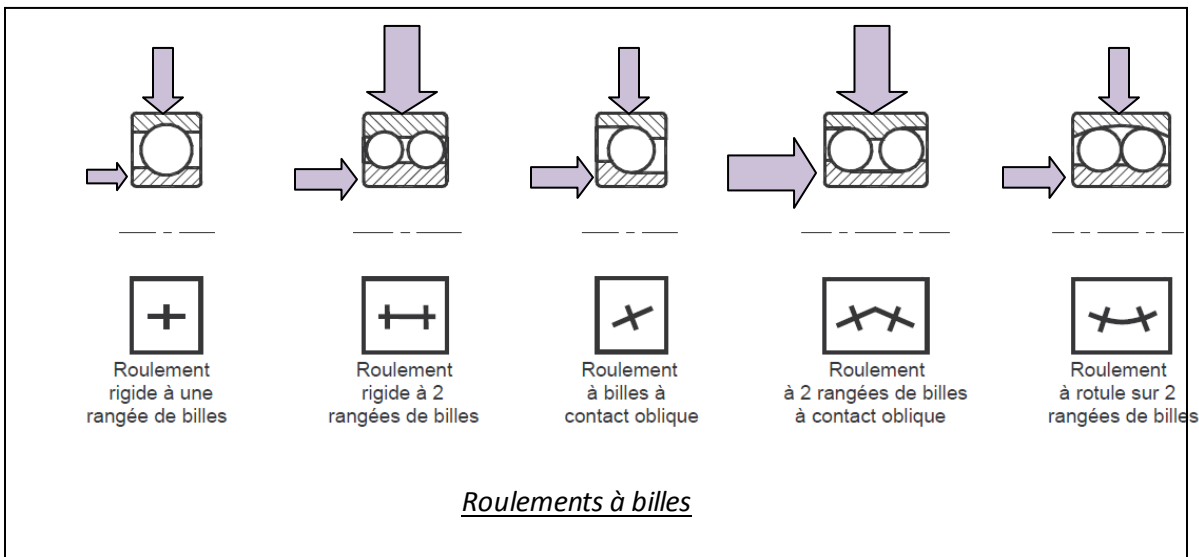
Défaut angulaire maxi : (environ)

- roulement radial à billes : 0,2 °
- roulement à 2 rangées de billes : 0 °
- roulement à rotule à billes : 3 °
- roulement à rouleaux cylindriques : 0,1 °
- roulement à rouleaux coniques : 0,1 °
- roulement à rotule à rouleaux : 1,5 °

4.5. Durée de vie

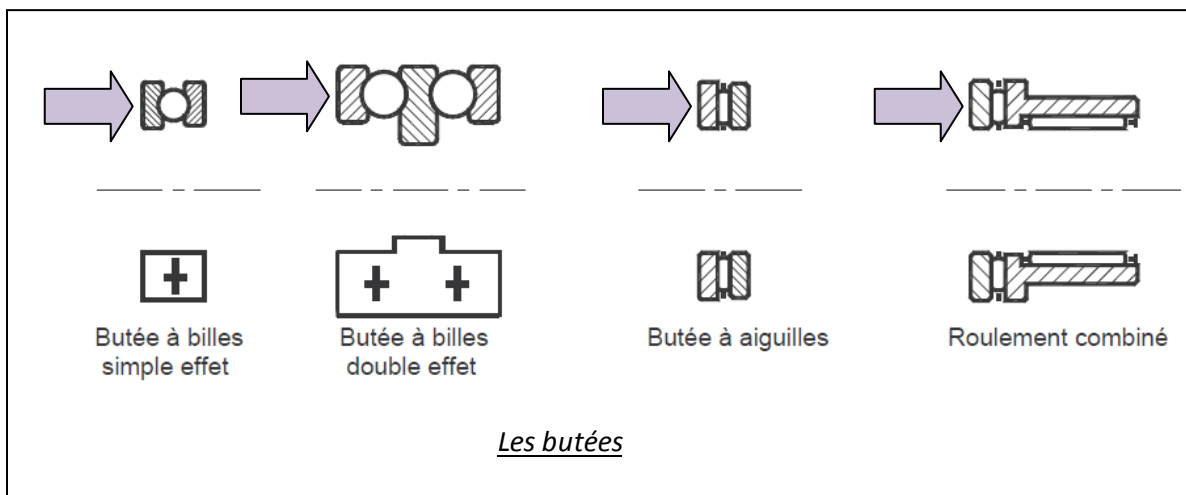
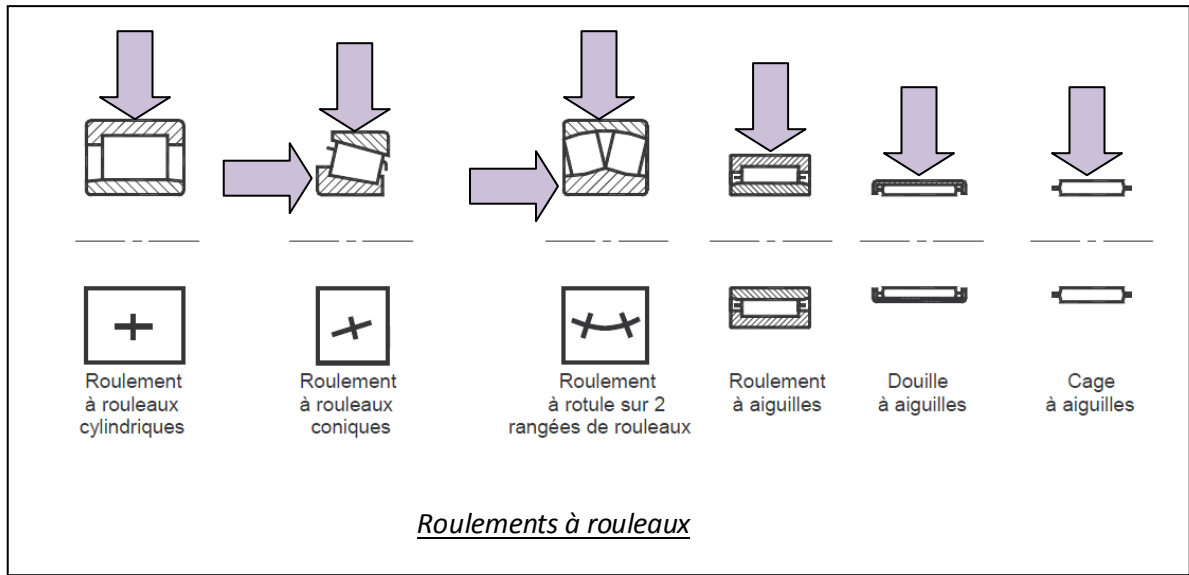
On apprendra à calculer la **durée de vie d'un roulement** selon les conditions d'utilisation.

SYNTHESE et différents types de roulements :





Architecture du guidage en rotation - Roulements à simple rangée de billes

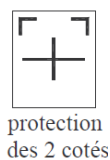
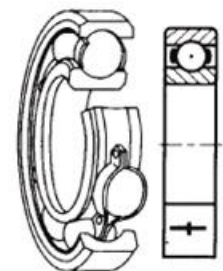


Ce chapitre détaille les règles de montage, le calcul de la durée de vie...etc...
uniquement pour le **roulement à billes à contact radial**

5. Dimensionnement et architecture des roulements à billes (contact radial)

Ils sont simples, **peu coûteux et très utilisés** dans les systèmes industriels. Comme nous l'avons vu, ils encaissent **d'importants efforts radiaux** (selon leur taille) mais **peu d'efforts axiaux**.

Ils peuvent être soit **graissés à vie** et possèdent alors des **joints d'étanchéité** intégrés pour éviter de perdre la graisse ; ou alors on devra **prévoir une lubrification** de celui-ci.



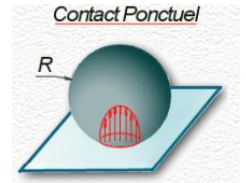


Architecture du guidage en rotation - Roulements à simple rangée de billes

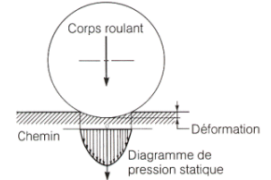
5.1. Etude du roulement – pression de contact

Les exigences de **roulement sans glissement** imposent des géométries particulières des éléments roulants. Avec des billes, le contact est **quasi ponctuel** ce qui évite le glissement (rayon des chemins de roulements > rayon des billes).

La théorie de **Hertz** sur les **pressions de contact** permet de définir les pressions encaissées par les roulements. Actuellement, les acier à roulement (100C6) admettent des pression superficielles de **2000 à 4200 Mpa**.



Pression de hertz et déformation au niveau du contact



5.2. Règle de fixation des bagues d'un roulement

Le choix de monter les bagues de roulement **serrées ou glissantes sur leur logement** est d'une grande importance. Il dépend de la **façon dont tourne le roulement**.

Si les bagues de roulement sont montées avec du jeu, il risque de se passer un phénomène de « **laminage** » de la bague (très dure) sur son logement qui amènera à la **destruction rapide** du roulement.

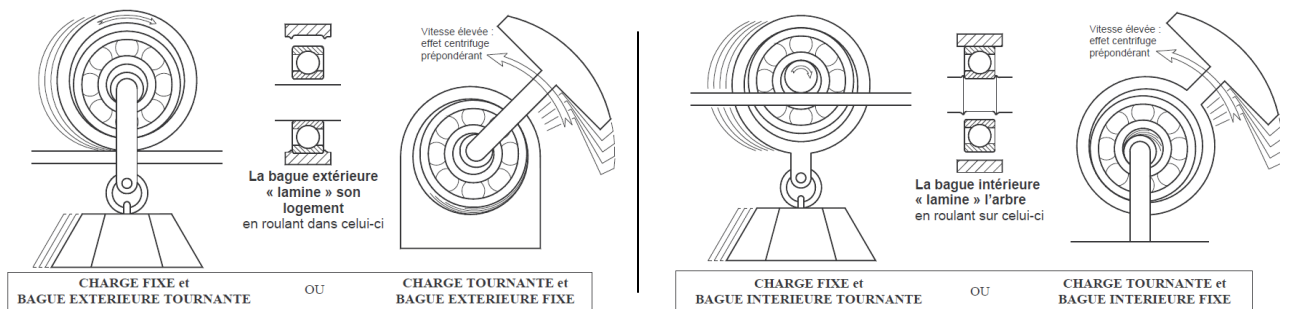


Laminage d'un logement



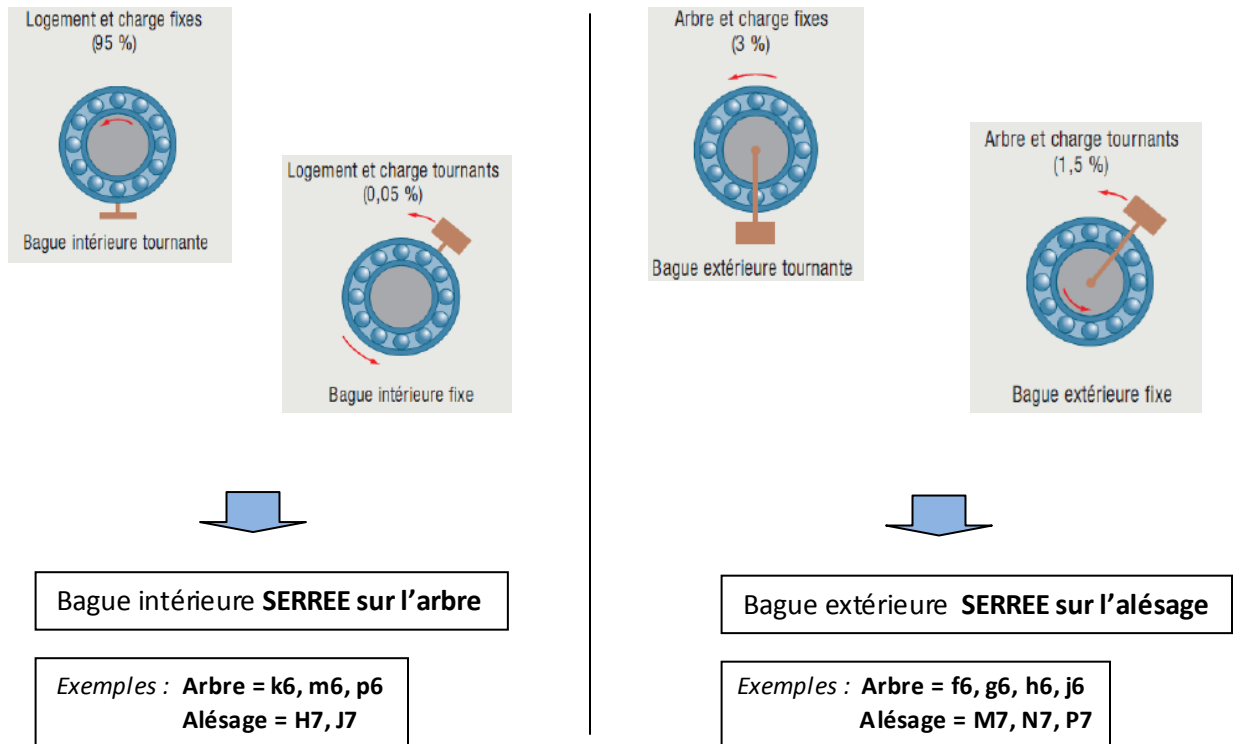
Laminage d'une bague extérieure

Illustration : les bagues sont montées avec jeu dans leur logement (jeu exagéré !)



Règle IMPORTANTE : pour éviter tout risque de laminage
Les **bagues Tournantes** par rapport à la **DIRECTION de la CHARGE** doivent être montées avec un **ajustement SERRE**.
Les **bagues FIXES** seront montées avec un **ajustement glissant** (permet un mouvement pour le réglage du jeu)

Voici un tableau des **ajustements de bagues** de roulement en fonction de la direction de la charge.

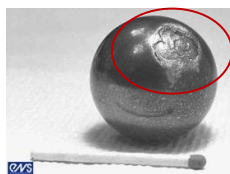
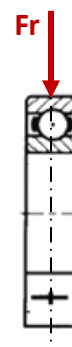


Nota : les ajustements choisis dépendront des charges appliquées.

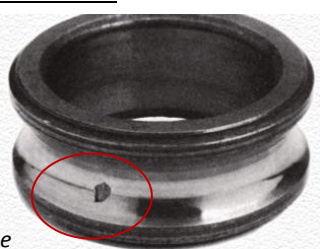
5.3. Direction des efforts admissibles

En isolant successivement un élément roulant, puis la bague intérieure de chaque roulement et en écrivant l'équilibre statique de ces éléments, on met en évidence les caractéristiques des **actions mécaniques transmissibles** par un roulement à contact radial.

La résultante des actions mécaniques transmissible (F_r) par les billes est contenue dans le **plan médian du roulement**. Ce type de roulements **peut transmettre de faibles efforts axiaux** (roulements à billes à gorges profondes).



Ecaillage d'une bille



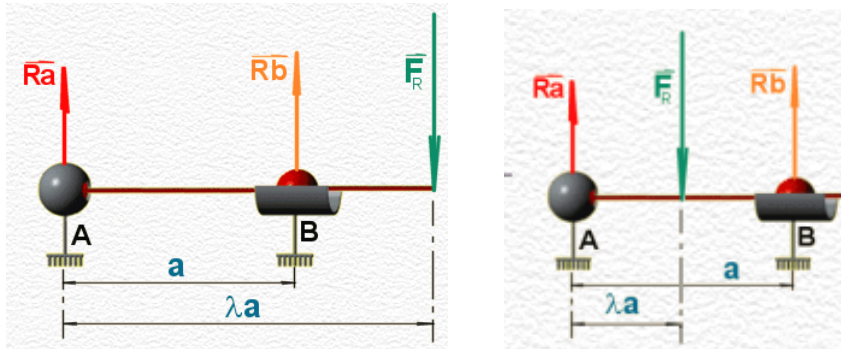
Ecaillage d'une bague

ATTENTION : En fonctionnement **normal sous charge**, les surfaces actives d'un roulement sont soumises à **des contraintes alternées très élevées** dues aux passages successifs des corps roulants sur les chemins. Elles finissent par créer, à plus ou moins long terme, des **fissurations par fatigue** de la matière qui détériore les billes et les bagues et **réduit la durée de vie**.

5.4. Calcul du chargement réel

Les efforts extérieurs se répercutent dans la liaison pivot et donc sur chaque palier. Selon le type de sollicitation, cela aura pour conséquence de **ne pas charger de la même façon les 2 roulements**. C'est un calcul de **STATIQUE** qui permettra de définir les **efforts radiaux et/ou axiaux** dans chaque palier. Voici des exemples de configurations :

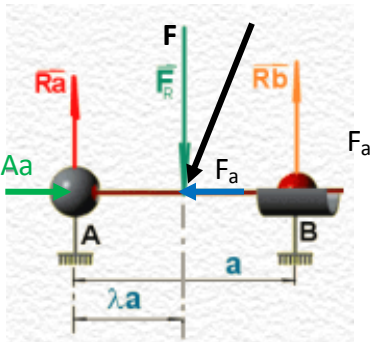
Sollicitation purement radiale sur l'arbre et donc les paliers :



Conseils : on place au plus près de la charge le roulement le plus résistant.

On essaye de centrer les paliers/efforts.

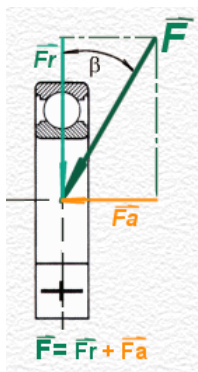
Sollicitation combinée sur l'arbre et donc sur les paliers :



Ici, l'effort appliqué à l'arbre est composé d'un effort radial F_r et d'une composante axiale F_a .

Conséquence : la rotule (roulement gauche) devra encaisser l'effort axial, il faudra le dimensionner en conséquence (un roulement à billes à gorges profondes pourra suffire, sinon, contacts obliques).

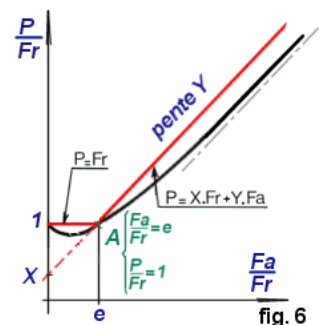
Charge équivalente P :



Même si les roulements à billes (contact radial) ne peuvent encaisser que de très faibles efforts axiaux, lorsqu'on a une combinaison de chargement axial F_a et radial F_r , on recherche expérimentalement la charge purement radiale qui aurait les mêmes effets destructeurs que la combinaison F_a et F_r . **Cette charge est appelée charge radiale équivalente et notée P.**

Si l'on trace la fonction $P/F_r = f(F_a/F_r)$ pour des roulements à billes à contacts radiaux, on obtient la courbe ci contre.

La fonction est égale à 1 pour $F_a/F_r=0$, décroît tout d'abord quand F_a/F_r augmente, passe par un minimum, puis tend vers une asymptote quand l'effort axial devient prépondérant.





Architecture du guidage en rotation - Roulements à simple rangée de billes

Méthode de calcul de la charge équivalente :

Dans le cas des roulements à une rangée de billes (fig. 6), on a deux droites d'équations:

Pour $F_a/F_r < e$, alors $P = F_r$	Pour $F_a/F_r > e$, alors $P = X.F_r + Y.F_a$
--------------------------------------	--

Les coefficients **e**, **X** et **Y** ont été établis par expérimentation et sont donnés dans les catalogues constructeurs.

Exemple de valeurs de chez SKF :

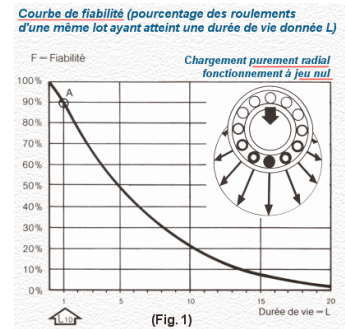
Coefficients de calcul : roulement à billes			
$F_a/F_r < e: P=F_r$			
$F_a/F_r > e: P=X.F_r+Y.F_a$			
F_a/Co	e	Y	X
0.014	0.19	2.3	0.56
0.028	0.22	1.99	0.56
0.056	0.26	1.71	0.56
0.084	0.28	1.55	0.56
0.11	0.3	1.45	0.56
0.17	0.34	1.31	0.56
0.28	0.38	1.15	0.56
0.42	0.42	1.04	0.56
0.56	0.44	1	0.56

5.5. Durée de vie d'un roulement

Essai de référence :

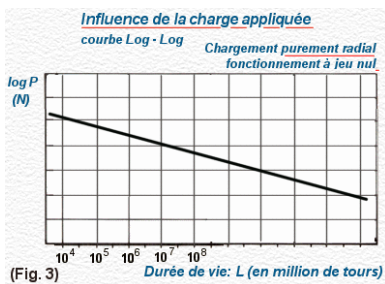
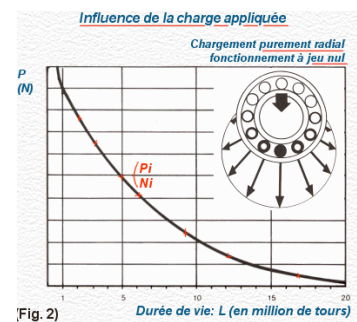
Etude statistique:

Prenons un lot de cent roulements identiques, et faisons les tourner sous une même charge équivalente radiale **P** jusqu'à mise hors d'usage par fatigue. Si nous représentons, en fonction du nombre de révolutions accomplies, le nombre de roulements en état de marche, nous obtenons le diagramme de la figure 1.



Influence de la charge appliquée:

Recommençons la même expérience, toujours avec les mêmes roulements, mais avec des charges **P_i** différentes. Nous obtenons des durées de vie moyennes fonctions de ces charges. L'allure de variation de cette fonction est donnée par le diagramme ci contre (Fig. 2).



Si nous représentons maintenant en **coordonnées logarithmiques**, le nombre de révolutions atteint en fonction de la charge appliquée, le diagramme prend alors l'allure d'une **droite**. (Fig. 3).



Architecture du guidage en rotation - Roulements à simple rangée de billes

Notion de DUREE de VIE :

On appelle **durée de vie nominale avant fatigue**, et on note " L_{10} ", le nombre de révolutions, exprimé en **millions de tours**, atteint pour **une charge donnée P**, par **90% des roulements**.

Le choix arbitraire, comme référence de calcul, d'une survie de 90% des roulements, plutôt que de la durée de vie moyenne, a été fait par les constructeurs et normalisé par l'I.S.O., pour des raisons de sécurité.

On appelle "**C**", **capacité de charge dynamique** d'un roulement, la charge sous laquelle au moins 90 % des roulements atteignent une durée de vie de 10^6 révolutions. (**donnée constructeur**).

On appelle "**C₀**", **capacité de charge statique** d'un roulement, qui sert pour son dimensionnement.

Détermination de la durée de vie nominale :

Considérons la droite représentative de la durée de vie de 90% des roulements.

On constate que la **penste de cette droite** est de **-1/3** pour les roulements à billes (contact ponctuel).

Ecrivons l'équation de cette droite entre les points A et B :

$$\log P - \log C = -1/3 (\log N - \log(10^6))$$

$$3 \cdot \log (C/P) = \log (N/10^6)$$

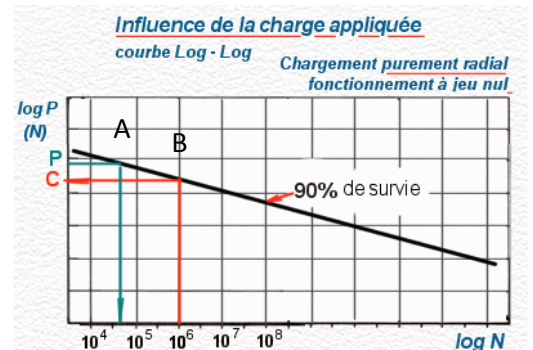
$$L_{10} = (C/P)^3$$

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^k$$

k = 3 pour les billes

$$C \geq P \cdot L^{(1/k)}$$

$$L_h = \frac{10^6 \cdot L}{60 \cdot n}$$

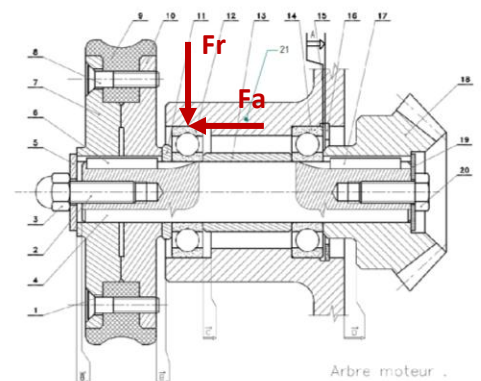


Exemple d'application :

Soit le roulement suivant monté sur l'arbre moteur : réf 61804
Il est sollicité par: Fr=750N, Fa=150N et tourne à 1000tr/min

Roulements rigides à billes, à une rangée, joints à faible frottement des deux côtés

Dimensions d'encombrement			Charges de base dynamique statique		Limite de fatigue	Vitesses de base	
d	D	B	C	C ₀	P _u	Vitesse de référence	Vitesse limite
mm	mm	mm	kN	kN	kN	tr/min	
20	32	7	4,03	2,32	0,104	45000	22000



On a : $F_a/C_0 = 150/2320 = 0.064$

Interpolation pour trouver e : $(e - 0.26)/(0.28 - 0.26) = (0.064 - 0.056)/(0.084 - 0.056)$
soit $e = 0.265$

On a : $F_a/F_r = 150/750 = 0.2 < e$, donc **P = Fr = 750N**

D'où : $L_{10} = (C/P)^3 = (4030/750)^3$, soit **L₁₀ = 155 millions de tours**.

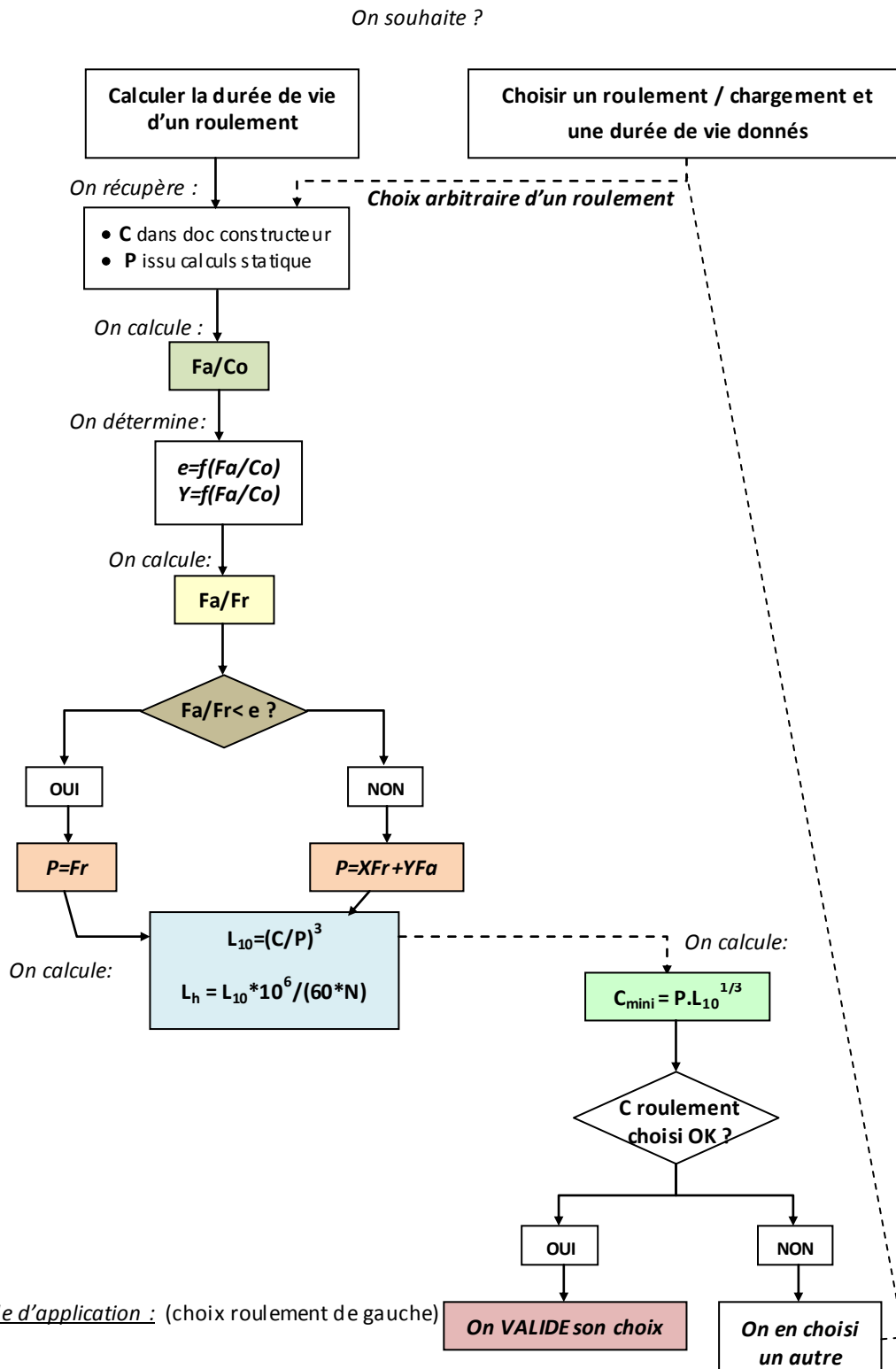
En heures, on a : $L_{10} = (10^6 \cdot 155)/(60 \cdot 1000)$, soit **L₁₀ = 2583h**

F _a /C ₀	e	γ	X
0.014	0.19	2.3	0.56
0.028	0.22	1.99	0.56
0.056	0.26	1.71	0.56
0.084	0.28	1.55	0.56



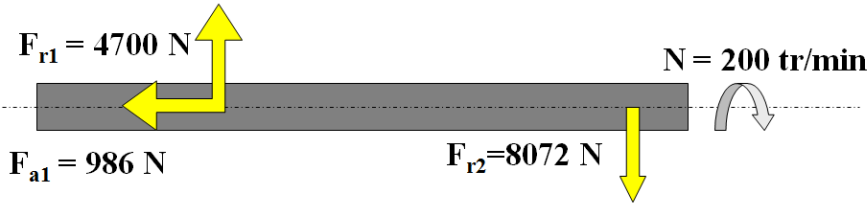
5.6. Algorithme de choix d'un roulement à bille à contact radial

Le choix d'un roulement connaissant les efforts encaissés s'effectue selon l'algorithme ci-dessous.





Architecture du guidage en rotation - Roulements à simple rangée de billes



On souhaite une durée de vie de 50Mt, un calcul de RDM donne $\Phi_{arbre}=29\text{ mm}$.

On choisit un roulement à bille chez un constructeur avec $\Phi=30\text{ mm}$ (SKF, SNR...):

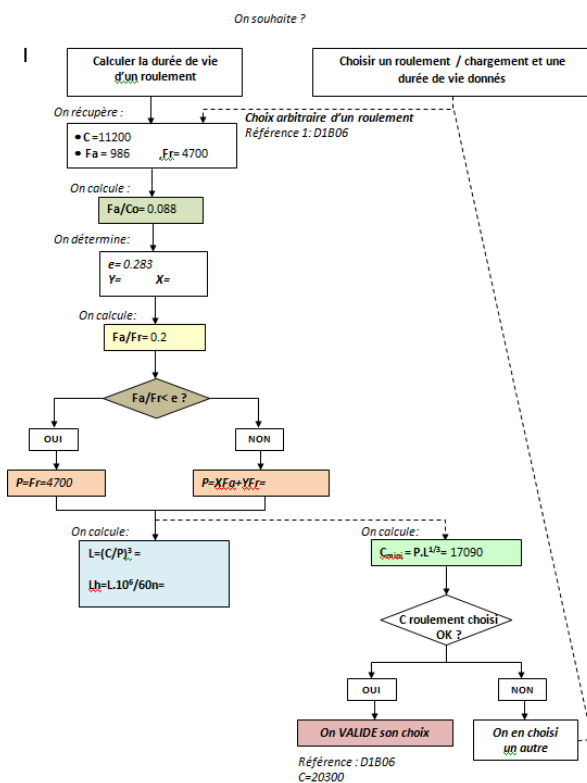
Fa/Co	e	Y	X
0.014	0.19	2.3	0.56
0.028	0.22	1.99	0.56
0.056	0.26	1.71	0.56
0.084	0.28	1.55	0.56
0.11	0.3	1.45	0.56
0.17	0.34	1.31	0.56
0.28	0.38	1.15	0.56
0.42	0.42	1.04	0.56
0.56	0.44	1	0.56

Roulements rigides à billes, ensembles-roulements avec joints, lubrifiés à l'huile ICOS

Tolérances, voir aussi le texte
Jeu interne radial, voir aussi le texte
Ajustements recommandés
Tolérances d'arbre et de logement

Dimensions d'encombrement				Charges de base		Limite de fatigue	Vitesse limite	Masse	Désignation
d	D	B	C	C	C ₀	P ₀	tr/min	kg	
mm				kN		kN			* - Roulement SKF Explorer
12	32	10	12.6	7.28	3.1	0.132	14000	0.041	ICOS-D1B01-TN9 *
15	35	11	13.2	8.06	3.75	0.16	12000	0.048	ICOS-D1B02-TN9 *
17	40	12	14.2	9.95	4.75	0.2	11000	0.071	ICOS-D1B03-TN9 *
20	47	14	16.2	13.5	6.55	0.28	9300	0.11	ICOS-D1B04-TN9 *
25	52	15	17.2	14.8	7.8	0.335	7700	0.14	ICOS-D1B05-TN9 *
30	62	16	19.4	20.3	11.2	0.475	6500	0.22	ICOS-D1B06-TN9 *

C₀ = charge statique = 11200N



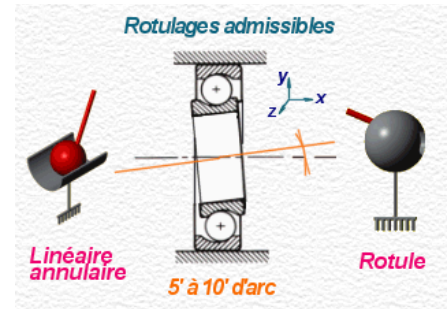
Attention : Si on ne trouvait pas de roulement tel que $C > C_{mini}$, les solutions possibles sont :

- choisir un roulement **plus résistant** avec même diamètre intérieur,
- **augmenter diamètre arbre**,
- choisir **autre type roulement** qui encaisse mieux F_a (contact oblique...)
- revoir la **conception** (position roulement / efforts) pour diminuer les efforts encaissés.

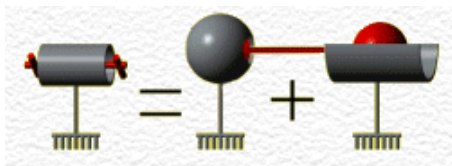
5.7. Architecture de montage des roulements à billes

L'architecture d'un montage de roulement désigne:

- la position relative des paliers et des charges extérieures
- les arrêts en translation retenus
- les serrages radiaux installés
- le réglage des jeux, de la précontrainte

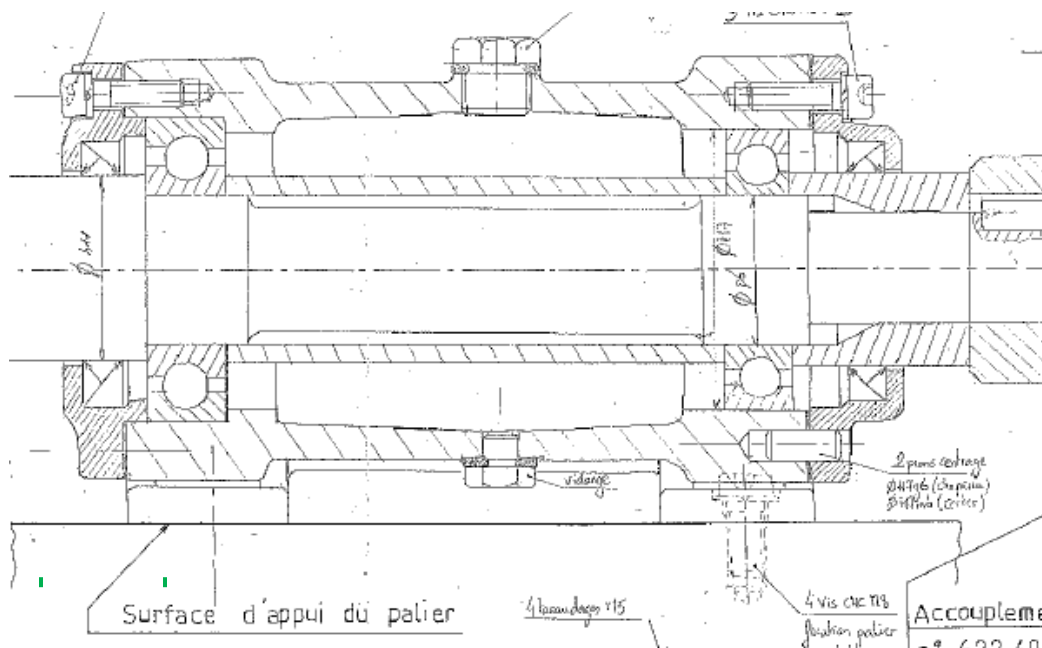


L'étude cinématique d'un roulement à **une rangée de billes** conduit à modéliser ce composant par **une liaison linéaire annulaire** ou **rotule**. (rotule = bagues bloquées axialement, L.A = au moins 1 bague est libre axialement)



La réalisation d'une **liaison pivot** à l'aide de roulements à une rangée de bille n'est donc possible que par l'**association de deux (2) roulements**. La liaison pivot la plus répandue est : **R + L.A**

Exemples :



5.8. Les arrêts axiaux

Il est difficile de donner des règles générales pour les arrêts axiaux, tant l'adaptation à de **multiples configurations particulières** est nécessaire. La **règle des 6 arrêts en translation** est toutefois une bonne base :

Chaque bague a un mouvement de translation éventuel dans deux directions, ce qui fait un total de 8 mouvements (4x2). Un montage correct (**isostatique**) doit assurer **6 arrêts en translation**.

- Ces arrêts peuvent être assurés par adhérence (collage) ou par obstacle (anneau, épaulement, écrou, chapeau).
- Cette règle doit être adaptée à chaque situation, essentiellement en fonction de la nature et de l'intensité des efforts axiaux.

Les éléments d'arrêts axiaux :

