Solution 1 : Montage de roulements à billes

Voici la démarche chronologique menant à la solution :

L'absence de jeu est obtenue grâce à un rattrapage de jeu par précontrainte du montage.

Le frottement est interdit, le rattrapage de jeu demande donc l'utilisation de deux roulements montés en opposition.

Le rotulage demandé nous indique qu'il faut rapprocher au maximum (idéalement faire coïncider) les centres de pivotement des roulements. Pour ce faire, un montage en « X » est avantageux.

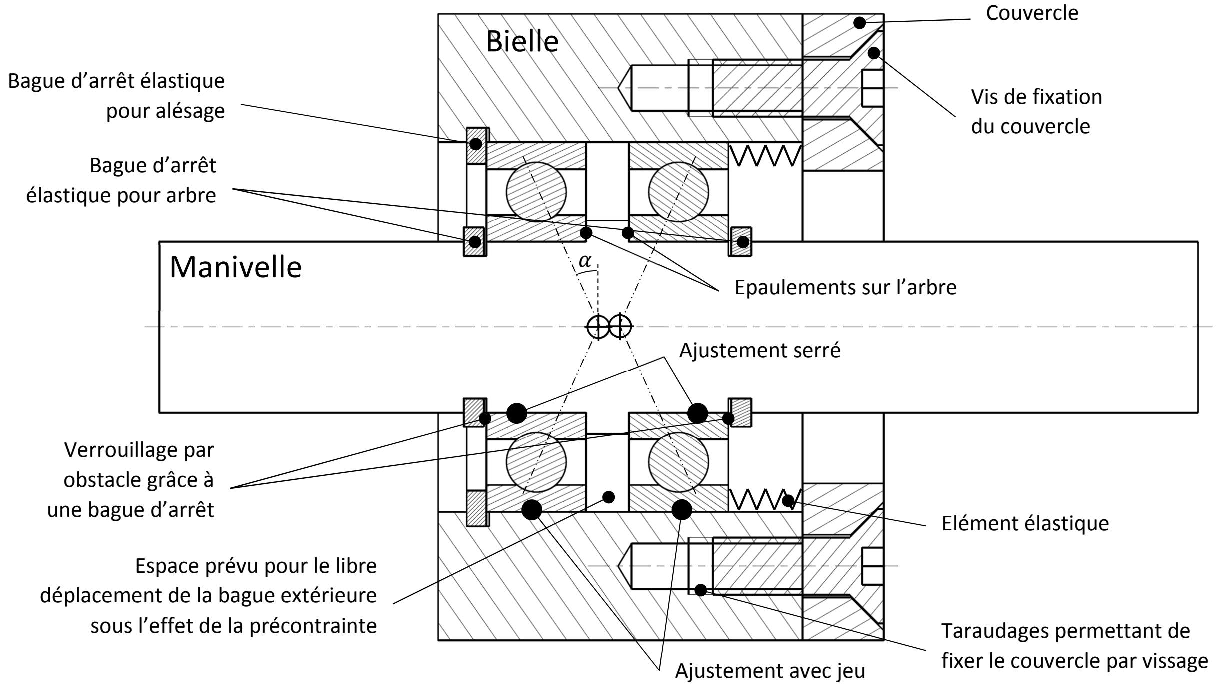
Il est possible de précontraindre un tel montage géométriquement ou élastiquement, mais la façon géométrique est interdite dans la donnée.

Le schéma du mécanisme permet de déterminer la direction de la charge s'appliquant au roulement : la force transitant de la manivelle à la bielle est constamment alignée avec l'axe longitudinal de cette dernière (dans le plan du schéma et passant par ses deux articulations). La direction de la charge appliquée sur les roulements est donc fixe par rapport aux bagues extérieures et tournante par rapport aux bagues intérieures, il faut donc prévoir un ajustement serré pour les bagues intérieures.

L'élément élastique utilisé pour exercer la précontrainte ne peut donc agir que sur les bagues extérieures.

Un ajustement avec jeu est préconisé pour les bagues extérieures afin de faciliter leur montage. Toutefois, au moins une des deux bagues extérieures doit absolument être ajustée avec jeu car elle doit pouvoir être libre de se déplacer axialement sous l'effet de l'élément élastique utilisé pour la précontrainte.

Solution :



Remarques :

- L'élément élastique peut être implémenté sous forme de ressort hélicoïdal de compression ou de rondelles élastiques.
- Les centres de pivotement sont rapprochés au maximum l'un de l'autre par le montage en «X» dans le but d'obtenir le rotulage demandé. Rappel : pour des roulements à gorge profonde, les lignes de force forment un angle de contact α allant de 4° à 10° en fonction du jeu interne du roulement.
- Les verrouillages par obstacle des bagues intérieures ajustées avec serrage garantissent un montage robuste aux vibrations et aux chocs.

Solution 2 : Rotor avec balourd

Question 1

$$F_c = m \cdot a_c = m \cdot r \cdot \omega^2 = \tfrac{\pi^2}{900} \cdot m \cdot r \cdot n^2 = 493{,}5 \text{ N}$$

Question 2

On fait la somme des couples autour du centre du roulement à gorge profonde afin de trouver la force F_r agissant sur le roulement à contact oblique. La force F_r s'applique au centre de pivotement éloigné d'une distance a de la face supérieure du roulement :

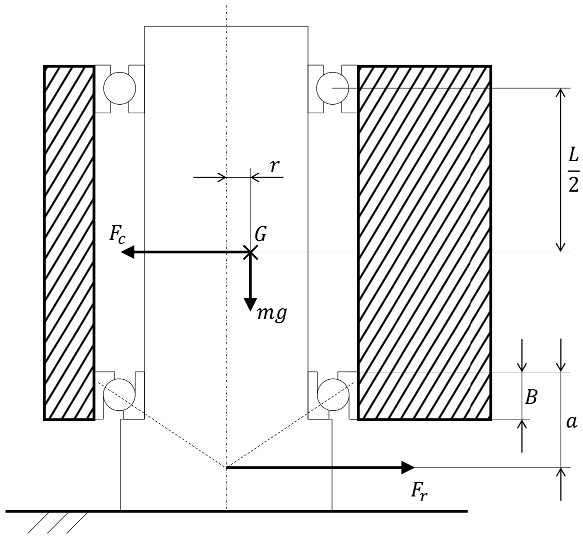


Figure 3.1. Forces agissant sur le rotor et sur le roulement à contact oblique.

$$F_r(L - \frac{B}{2} + a) - F_c \cdot \frac{L}{2} - mgr = 0$$

On en tire :

$$F_r = \frac{F_c \frac{L}{2} + mgr}{L - \frac{B}{2} + a} = 232{,}14 \text{ N}$$

Le terme mgr peut être négligé face à $F_c \frac{L}{2}$, on obtient ainsi $F_r = 232{,}12$ N.

Question 3

La durée de vie est donnée par la relation :

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

On calcule la force axiale maximale reprise par le roulement à contact oblique. Dans le pire des cas, lorsque le roulement à gorge profonde ne reprend aucune force axiale, toute la force axiale est sur le roulement à contact oblique :

$$F_{atot} = m \cdot g = 39{,}24 \text{ N}$$

On vérifie le rapport $\frac{F_{atot}}{F_r}$ afin de déterminer la charge dynamique équivalente P :

$$\tfrac{F_{atot}}{F_r} = 0{,}17 < 1{,}14$$

Donc

$$P = F_r$$

On obtient finalement

$$L_{10} = 27'659{,}6 \text{ millions de tours}$$

Soit une durée de vie du roulement à contact oblique de

$$L_{10h} = 30'733 \text{ h, ce qui correspond à 3,5 ans}$$

Question 4

a) La charge est tournante sur la bague intérieure. Il est donc recommandé de chasser la bague intérieure sur l'arbre. On montera donc la bague extérieure avec jeu.

b) Le ressort doit agir sur la bague disposant d'un ajustement avec jeu afin qu'il puisse remplir sa fonction de précontrainte, il faut donc qu'il agisse sur la bague extérieure.

c) Afin que les lignes de forces engendrent un montage de type « en O », il faut que le ressort pousse la bague extérieure du roulement à gorge profonde contre le haut.

Solution 3a : Durée de vie de roulements

La durée de vie est impactée par la charge dynamique sur le roulement selon la relation suivante : $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$ avec C donné dans le catalogue (a.) et P à calculer (b.) selon le cas de charge réel pour le roulement le plus chargé.

a. D'après l'extrait du catalogue ©SKF pages 322–323, on lit pour ce montage :

- $C = 5{,}4$ kN
- $C_0 = 2{,}36$ kN
- $f_0 = 13$, facteur pour le calcul de P

b. Calcul de P
Equilibre statique : $\sum \vec{M} = \vec{0}, \quad \sum \vec{F} = \vec{0}$:

- Charge axiale : $F_a = F \cdot \cos(\alpha) = 100 \cdot \cos(45) = 70{,}7$ N
- Charge radiale : $F_r = \frac{\ell_b}{\ell_a} F \cdot \sin(\alpha) = \frac{100}{80} 100 \cdot \sin(45) = 88{,}4$ N

Deux cas possibles :

- **cas 1** : si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$
- **cas 2** : si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r$

où e, X et Y sont donnés dans le catalogue ©SKF au tableau 8 en fonction de $\frac{f_0 \cdot F_a}{C_0} = \frac{13 \cdot 70{,}7}{2{,}36 \cdot 10^3} = 0{,}4$:

$$e = 0{,}22 \qquad X = 0{,}56 \qquad Y = 1{,}99$$

Comme $\frac{F_a}{F_r} = \frac{70{,}7}{88{,}4} = 0{,}8 > e$ alors $P = 0{,}56 \cdot 88{,}4 + 1{,}99 \cdot 70{,}7 = \boxed{190{,}2 \text{ N}}$

Finalement la durée de vie du montage vaut :

- $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 = \left(\frac{5{,}4 \cdot 10^3}{190{,}2}\right)^3 = 22880{,}7$ millions de tours.
- $L_{10\,h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 22880{,}7}{60 \cdot 5000} = 76269$ heures soit $\boxed{8{,}7 \text{ années}}$.

Solution 3b : Durée de vie de roulements

La durée de vie est impactée par la charge dynamique sur le roulement selon la relation suivante : $L_{10} = \left(\frac{C_{\text{PAIRE}}}{P_{\text{PAIRE}}}\right)^3$ avec $C_{\text{PAIRE}} = 1{,}62 \cdot C$ donné dans le catalogue (a.) et P à calculer (b.) selon le cas de charge réel pour le roulement le plus chargé.

a. D'après l'extrait du catalogue ©SKF pages 506–507, on lit pour ce montage :

- $C = 7{,}61$ kN
- $C_{\text{PAIRE}} = 1{,}62 \cdot C = 1{,}62 \cdot 7{,}61 \cdot 10^3 = 12{,}3$ kN

b. Calcul de P
Equilibre statique : $\sum \vec{M} = \vec{0}, \quad \sum \vec{F} = \vec{0}$:

- Charge axiale : $F_a = F \cdot \cos(\alpha) = 100 \cdot \cos(45) = 70{,}7$ N
- Charge radiale : $F_r = \frac{\ell_b}{\ell_a} F \cdot \sin(\alpha) = \frac{100}{80} 100 \cdot \sin(45) = 88{,}4$ N

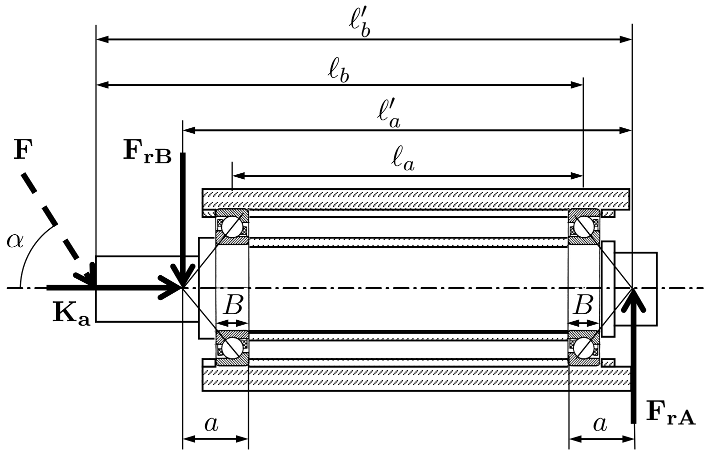
Comme vu en cours, puisque $\frac{F_a}{F_r} = 0{,}8 < 1{,}14$ alors $P_{\text{PAIRE}} = 88.4 + 0{,}55 \cdot 70{,}7 = \boxed{127{,}3 \text{ N}}$
Finalement la durée de vie du montage vaut :

- $L_{10} = \left(\frac{C_{\text{PAIRE}}}{P_{\text{PAIRE}}}\right)^3 = \left(\frac{12328}{127{,}3}\right)^3 = 908712$ millions de tours.
- $L_{10\,h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 908712}{60 \cdot 5000} = 3029041$ heures soit $\boxed{345{,}8 \text{ années}}$.

Solution 3c : Durée de vie de roulements

Remarques

- chaque roulement à contact oblique doit être considéré comme un roulement seul
- les forces n'agissent pas au centre du roulement, mais sont décalées vers l'extérieur (cf. catalogue).
- pour le calcul, on considère que les forces agissent à une distance a de la face du roulement. a étant la position du point de charge par rapport à la face avant du roulement.



D'après le catalogue ©SKF page 506–507 :

- Charge dynamique de base : $C = 7{,}61$ kN
- Position du point de charge par rapport à la face avant : $a = 14$ mm
- Largeur du roulement : $B = 10$ mm

Géométrie corrigée pour le calcul des charges radiales :

- $\ell'_a = \ell_a - B + 2 \cdot a = 98$ mm
- $\ell'_b = \ell_b - \frac{B}{2} + a = 109$ mm

Calcul des charges radiales (équilibre statique : $\sum \vec{M} = \vec{0}, \quad \sum \vec{F} = \vec{0}$) :

- Roulement de droite (A) : $F_{rA} = F \cdot \sin(\alpha) \cdot \left(\frac{\ell'_b - \ell'_a}{\ell'_a}\right) = 7{,}9$ N
- Roulement de gauche (B) : $F_{rB} = F \cdot \sin(\alpha) \cdot \left(\frac{\ell'_b}{\ell'_a}\right) = 78{,}6$ N

Force axiale sur l'arbre (notation SKF) :

- $K_a = F \cdot \cos(\alpha) = 70{,}7$ N

Charges axiales avec prise en compte de l'effet des charges radiales selon le tableau 11 à la page 496 et du coefficient R à la page 495 du catalogue ©SKF :

- Abscisse du diagramme : $\frac{K_a}{C} = 0{,}0093$
- On lit : $R \cong 0.92$

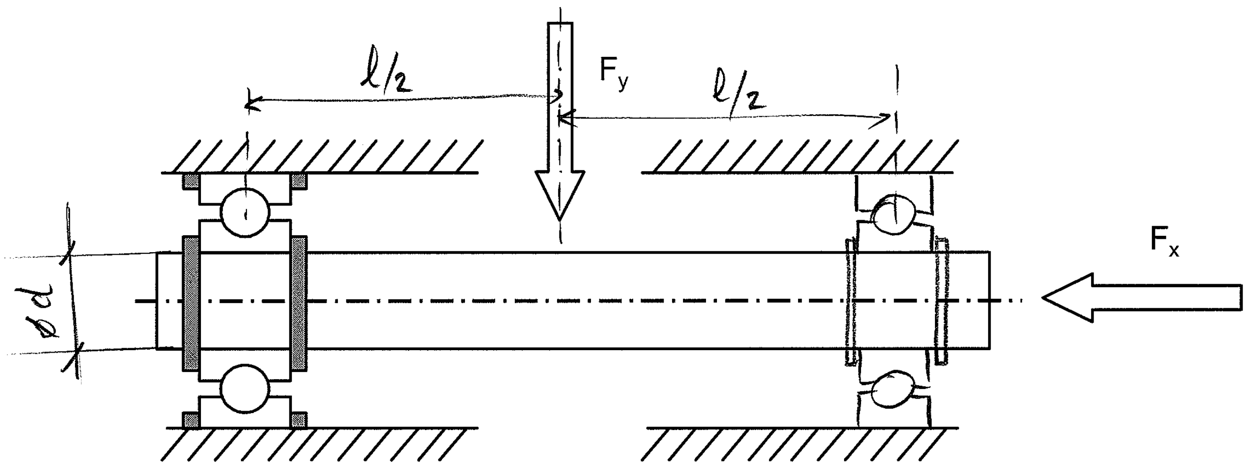
Comme $F_{rA} < F_{rB}$ et que $K_A \geq R \cdot (F_{rB} - F_{rA})$ nous sommes dans le cas 1b selon le tableau 11 à la page 496 du catalogue ©SKF, par conséquent :

- $F_{aA} = R \cdot F_{rA} = 7{,}3$ N
- $F_{aB} = F_{aA} + K_a = 78{,}0$ N

Calcul de la durée de vie du roulement le plus chargé, ici le (B) :

- $\frac{F_{aB}}{F_{rB}} \leq 1,14$ donc $P = F_{rB}$
- $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 = 905936$ millions de tours.
- $L_{10\,h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 905936}{60 \cdot 5000} = 3019788$ heures soit $\boxed{\text{344,7 années}}$.

Solution 3d : Montage de roulements



Bague intérieure	☑ Charge tournante ☐ Charge fixe
Bague extérieure	☐ Charge tournante ☑ Charge fixe
Tolérances arbre et logement de gauche	**Ajustement bague extérieure dans logement** Tolérance du logement : H7 (0 +18) Jeu théorique min : $j_{2_{\min}} = 0\,\mu m$ Jeu théorique max : $j_{2_{\max}} = 26\,\mu m$ (tableau 8b) **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : js5 (+2,5 -2,5) Serrage théorique min : $j_{1_{\min}} = 2{,}5\,\mu m$ (jeu) Serrage théorique max : $j_{1_{\max}} = -10{,}5\,\mu m$ (serrage, voir tableau 7c)
Tolérances arbre et logement de droite	Idem au roulement de gauche
Force axiale côté gauche	F_x
Force radiale côté gauche	$F_y/2$
Force axiale côté droit	0
Force radiale côté droit	$F_y/2$
Jeu radial	Min : $0\,\mu m$ Max : $41{,}5\,\mu m$ Ce résultat est identique à gauche et à droite.

Explication du calcul du jeu radial

Le jeu radial total (jeu entre l'arbre et le support extérieur) est la somme des jeux d'ajustements de la bague intérieure avec l'arbre, de la bague extérieure dans le logement et du jeu interne du roulement. Les jeux internes sont donnés par les tableaux n°6 pour les roulements rigides à billes et n°3 pour les roulements à rouleaux cylindriques. Toutefois, un serrage de la bague intérieure sur l'arbre ou de la bague extérieur dans le logement provoque une réduction Δr_{ajust} du jeu interne :

$$\Delta r_{\text{ajust}} = \Delta_1 f_1 + \Delta_2 f_2$$

où f_1 et f_2 sont les facteurs de réduction pour les bagues intérieure et extérieure respectivement donnés par le diagramme 3. Δ_1 est le serrage théorique entre la bague intérieure et l'arbre et prend une valeur nulle en cas de jeu. Δ_2 est le serrage théorique entre la bague extérieure et le logement et prend une valeur nulle en cas de jeu.

Détail du calcul :

- $\Delta_{1_{\text{min}}} = 0\,\mu m$
- $\Delta_{1_{\text{max}}} = -j_{1_{\text{max}}} = 10{,}5\,\mu m$
- $\Delta_2 = 0\,\mu m$ (car il y a du jeu).
- $f_1 = 0{,}78$ (diagramme 3 avec $\frac{d}{D} = 0{,}46$)
- Jeu interne minimum avant réduction : $j_{\text{int}_{\text{min}}} = 2\,\mu m$ (classe « Normal »)
- Jeu interne maximum avant réduction : $j_{\text{int}_{\text{max}}} = 13\,\mu m$

Les réductions de jeu interne dues au serrage sont calculées :

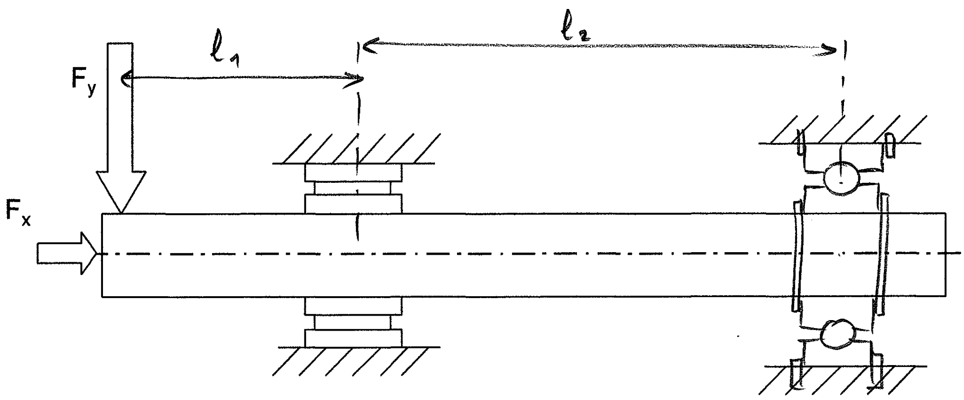
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\text{min}}} = \Delta_{1_{\text{min}}} f_1 = 0\,\mu m$
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\text{max}}} = \Delta_{1_{\text{max}}} f_1 = 8{,}2\,\mu m$

Les jeux internes après réduction peuvent maintenant être calculés :

- Jeu interne minimum après réduction = jeu interne minimum avant réduction - réduction maximale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\text{min}}} = j_{\text{int}_{\text{min}}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\text{max}}} = 2 - 8{,}2 = -6{,}2\,\mu m$ mais le jeu ne peut pas être plus petit que 0, donc $j_{\text{int-ajust}_{\text{min}}} = 0$. Attention : ceci indique la perte du jeu interne, ce qui conduit à une usure prématurée du roulement.
- Jeu interne maximum après réduction = jeu interne maximum avant réduction - réduction minimale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\text{max}}} = j_{\text{int}_{\text{max}}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\text{min}}} = 13 - 0 = 13\,\mu m$.

Le jeu radial total est donc :
Minimum : $j_{2_{\text{min}}} + j_{\text{int-ajust}_{\text{min}}} = 0 + 0 = 0\,\mu m$
Maximum : $j_{2_{\text{max}}} + j_{1_{\text{min}}} + j_{\text{int-ajust}_{\text{max}}} = 26 + 2{,}5 + 13 = 41{,}5\,\mu m$
Ce résultat est identique à gauche et à droite.

Solution 3e : Montage de roulements



Bague intérieure	☑ Charge tournante ☐ Charge fixe
Bague extérieure	☐ Charge tournante ☑ Charge fixe
Tolérances arbre et logement de gauche	**Ajustement bague extérieure dans logement** Tolérance du logement : H7 (0 +25) Jeu théorique min : $j_{2_{\text{min}}} = 0\,\mu m$ Jeu théorique max : $j_{2_{\text{max}}} = 36\,\mu m$ **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : k5 (+9 +1) Serrage théorique min : $j_{1_{\text{min}}} = -1\,\mu m$ (serrage) Serrage théorique max : $j_{1_{\text{max}}} = -17\,\mu m$ (serrage, tableau 7d)
Tolérances arbre et logement de droite	**Ajustement bague extérieure dans logement** Idem au roulement de gauche **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : js5 (+4 -4) Serrage théorique min : $j_{1_{\text{min}}} = 4\,\mu m$ (jeu) Serrage théorique max : $j_{1_{\text{max}}} = -12\,\mu m$ (serrage)
Force axiale côté gauche	0
Force radiale côté gauche	$F_y \cdot \frac{l_1+l_2}{l_2}$
Force axiale côté droit	F_x
Force radiale côté droit	$F_y \cdot \frac{l_1}{l_2}$
Jeu radial	**Gauche** Min : 7,1 μm, Max : 80,2 μm **Droite** Min : 0 μm, Max : 58 μm

Détail du calcul du jeu radial côté gauche (roulement à rouleaux)

- $\Delta_{1_{\min}} = -j_{1_{\min}} = 1\,\mu m$, $\quad \Delta_{1_{\max}} = -j_{1_{\max}} = 17\,\mu m$, $\quad \Delta_2 = 0\,\mu m$,
- $f_1 = 0{,}76$ (diag. 3, $\frac{d}{D} = 0{,}43$)
- Jeu interne minimum avant réduction : $j_{\text{int}_{\min}} = 20\,\mu m$ (classe « Normal »)
- Jeu interne maximum avant réduction : $j_{\text{int}_{\max}} = 45\,\mu m$

Les réductions de jeu interne dues au serrage sont calculées.

- $\Delta r_{\text{ajust}_{\min}} = \Delta_{1_{\min}} f_1 = 0{,}76\,\mu m$
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\max}} = \Delta_{1_{\max}} f_1 = 12{,}9\,\mu m$

Les jeux internes après réduction peuvent maintenant être calculés :

- Jeu interne minimum après réduction = jeu interne minimum avant réduction - réduction maximale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\min}} = j_{\text{int}_{\min}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\max}} = 20 - 12{,}9 = 7{,}1\,\mu m$
- Jeu interne maximum après réduction = jeu interne maximum avant réduction - réduction minimale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\max}} = j_{\text{int}_{\max}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\min}} = 45 - 0{,}76 = 44{,}2\,\mu m$.

Le jeu radial total est donc :
Minimum : $j_{2_{\min}} + j_{\text{int-ajust}_{\min}} = 0 + 7{,}1 = 7{,}1\,\mu m$
Maximum : $j_{2_{\max}} + j_{\text{int-ajust}_{\max}} = 36 + 44{,}2 = 80{,}2\,\mu m$

Détail du calcul du jeu radial côté droit (roulement à billes)

- $\Delta_{1_{\min}} = 0\,\mu m$, $\quad \Delta_{1_{\max}} = -j_{1_{\max}} = 12\,\mu m$, $\quad \Delta_2 = 0\,\mu m$, $\quad f_1 = 0{,}76$ (diag. 3, $\frac{d}{D} = 0{,}43$)
- Jeu interne minimum avant réduction : $j_{\text{int}_{\min}} = 3\,\mu m$ (classe « Normal »)
- Jeu interne maximum avant réduction : $j_{\text{int}_{\max}} = 18\,\mu m$

Les réductions de jeu interne dues au serrage sont calculées.

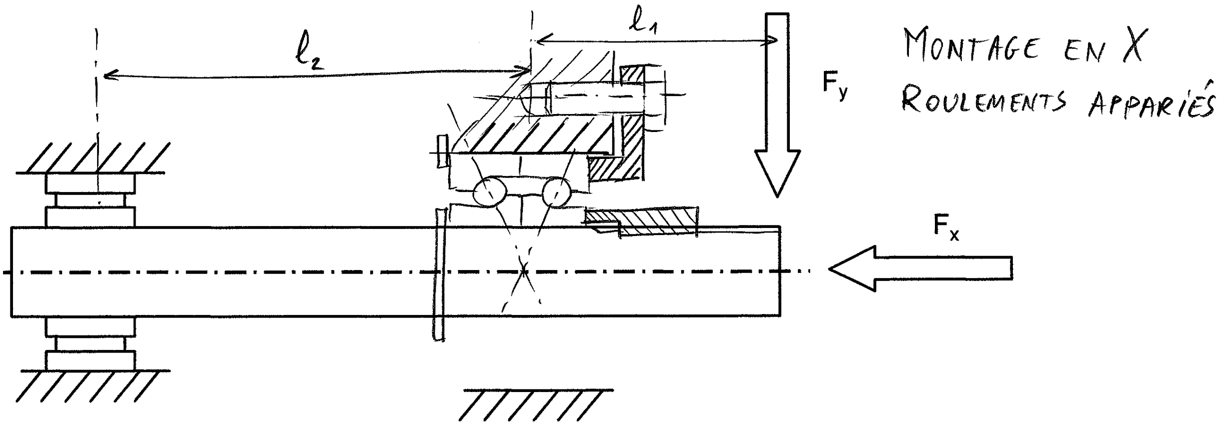
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\min}} = \Delta_{1_{\min}} f_1 = 0\,\mu m$
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\max}} = \Delta_{1_{\max}} f_1 = 9{,}1\,\mu m$

Les jeux internes après réduction peuvent maintenant être calculés :

- Jeu interne minimum après réduction = jeu interne minimum avant réduction - réduction maximale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\min}} = j_{\text{int}_{\min}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\max}} = 3 - 9{,}1 = -6{,}1\,\mu m$ mais le jeu ne peut pas être plus petit que 0, donc $j_{\text{int-ajust}_{\min}} = 0$. Attention : ceci indique la perte du jeu interne, ce qui conduit à une usure prématurée du roulement.
- Jeu interne maximum après réduction = jeu interne maximum avant réduction - réduction minimale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\max}} = j_{\text{int}_{\max}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\min}} = 18 - 0 = 18\,\mu m$.

Le jeu radial total est donc :
Minimum : $j_{2_{\min}} + j_{\text{int-ajust}_{\min}} = 0 + 0 = 0\,\mu m$
Maximum : $j_{2_{\max}} + j_{1_{\min}} + j_{\text{int-ajust}_{\max}} = 36 + 4 + 18 = 58\,\mu m$ ($j_{1_{\min}} > 0$ signifie qu'il y a du jeu aussi entre la bague intérieure et l'arbre)

Solution 3f : Montage de roulements



Bague intérieure	☑ Charge tournante ☐ Charge fixe
Bague extérieure	☐ Charge tournante ☑ Charge fixe
Tolérances arbre et logement de gauche	**Ajustement bague extérieure dans logement** Tolérance du logement : H7 (0 +25) Jeu théorique min : $j_{2_{\min}} = 0\,\mu m$ Jeu théorique max : $j_{2_{\max}} = 36\,\mu m$ **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : k5 (+9 +1) Serrage théorique min : $j_{1_{\min}} = -1\,\mu m$ (serrage) Serrage théorique max : $j_{1_{\max}} = -17\,\mu m$ (serrage)
Tolérances arbre et logement de droite	**Ajustement bague extérieure dans logement** Idem au roulement de gauche **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : js5 (+4 -4) Serrage théorique min : $j_{1_{\min}} = 4\,\mu m$ (jeu) Serrage théorique max : $j_{1_{\max}} = -12\,\mu m$ (serrage)
Force axiale côté gauche	0
Force radiale côté gauche	$F_y \cdot \frac{l_1}{l_2}$
Force axiale côté droit	Selon précharge : classe GB 30 N + F_x à 330 N + F_x sur le roulement de gauche 30 N − F_x à 330 N − F_x sur le roulement de droite (On néglige l'effet des charges radiales)
Force radiale côté droit	$F_y \cdot \frac{l_1+l_2}{l_2}$
Jeu radial	**Gauche** Min : 7,1 μm, Max : 80,2 μm **Droite** Min : 0 μm, Max : 40 μm

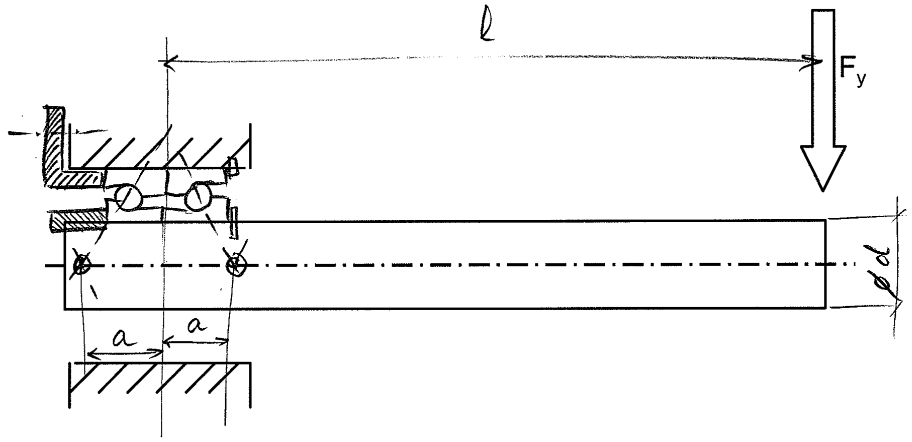
Détail du calcul du jeu radial côté gauche (roulement à rouleaux)

Même calcul que pour le roulement de gauche à l'exercice 5.

Détail du calcul du jeu radial côté droit (roulements à billes à contact oblique appariés)
Le jeu interne est nul car on utilise des roulements appariés précontraints géométriquement.

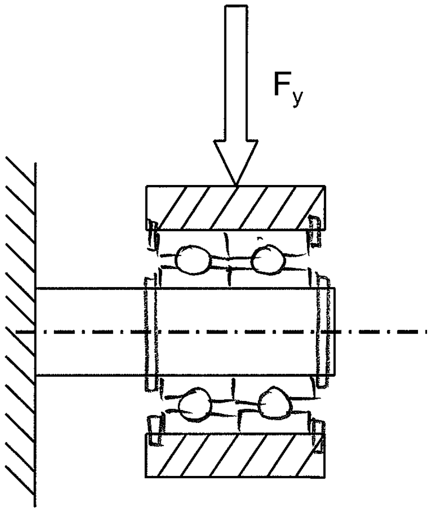
Le jeu radial total est donc :
Minimum : $j_{2_{\min}} = 0\,\mu m$
Maximum : $j_{2_{\max}} + j_{1_{\min}} = 36 + 4 = 40\,\mu m$ ($j_{1_{\min}} > 0$ signifie qu'il y a du jeu aussi entre la bague intérieure et l'arbre)

Solution 3g : Montage de roulements



Bague intérieure	☑ Charge tournante ☐ Charge fixe
Bague extérieure	☐ Charge tournante ☑ Charge fixe
Tolérances arbre et logement de gauche	**Ajustement bague extérieure dans logement** Tolérance du logement : H7 (0 +25) Jeu théorique min : $j_{2_{\min}} = 0\,\mu m$ Jeu théorique max : $j_{2_{\max}} = 36\,\mu m$ **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : js5 (+4 -4) Serrage théorique min : $j_{1_{\min}} = 4\,\mu m$ (jeu) Serrage théorique max : $j_{1_{\max}} = -12\,\mu m$ (serrage)
Tolérances arbre et logement de droite	Idem au roulement de gauche
Force axiale côté gauche	Selon précharge : classe GB 30 à 330 N (On néglige l'effet des charges radiales)
Force radiale côté gauche	$F_y \cdot \frac{l-a}{2 \cdot a}$
Force axiale côté droit	Selon précharge : classe GB 30 à 330 N (On néglige l'effet des charges radiales)
Force radiale côté droit	$F_y \cdot \frac{l+a}{2 \cdot a}$
Jeu radial	Min : $0\,\mu m$ Max : $40\,\mu m$ (Calcul idem à l'exercice 6, côté droit)

Solution 3h : Montage de roulements



Bague intérieure	☐ Charge tournante ☑ Charge fixe
Bague extérieure	☑ Charge tournante ☐ Charge fixe
Tolérances arbre et logement de gauche	**Ajustement bague extérieure dans logement** Tolérance du logement : N7 (-23 -5) Serrage théorique min : $j_{2_{\min}} = +3\,\mu m$ (jeu) Serrage théorique max : $j_{2_{\max}} = -23\,\mu m$ (serrage) **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : g6 (-4 -12) Jeu théorique min : $j_{1_{\min}} = -4\,\mu m$ (serrage) Jeu théorique max : $j_{1_{\max}} = 12\,\mu m$ (jeu) Attention : Possibilité d'avoir du serrage sur les deux bagues simultanément → difficultés de montage
Tolérances arbre et logement de droite	Idem au roulement de gauche
Force axiale côté gauche	0
Force radiale côté gauche	$F_y/2$
Force axiale côté droit	0
Force radiale côté droit	$F_y/2$
Jeu radial	Min : $0\,\mu m$ Max : $28\,\mu m$

Détail du calcul du jeu radial

$$\Delta_{1_{\min}} = 0\,\mu m, \quad \Delta_{1_{\max}} = -j_{1_{\min}} = 4\,\mu m, \quad \Delta_{2_{\min}} = 0\,\mu m, \quad \Delta_{2_{\max}} = -j_{2_{\max}} = 23\,\mu m, \quad f_1 = 0{,}77,$$
$$f_2 = 0{,}87 \text{ (diag. 3, } \frac{d}{D} = 0{,}46 \text{)}$$

Les réductions de jeu interne dues au serrage sont calculées. Ces valeurs sont identiques pour les deux roulements comme ils ont le même diamètre.

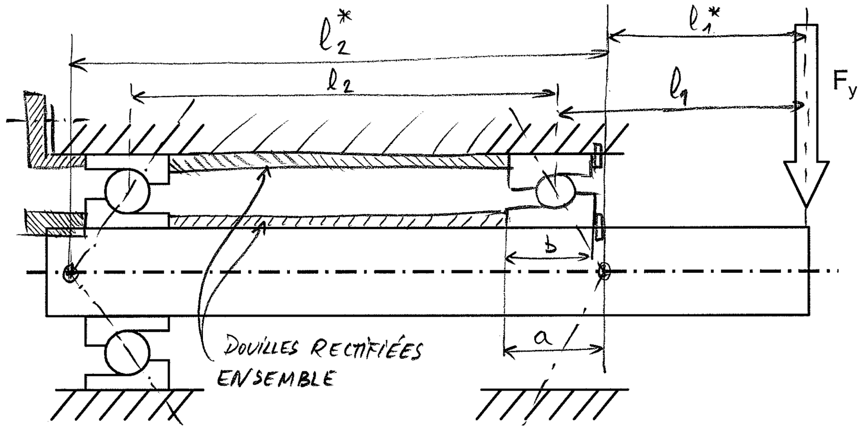
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\min}} = \Delta_{1_{\min}} f_1 + \Delta_{2_{\min}} f_2 = 0\,\mu m$
- $\Delta r_{\text{ajust}_{\max}} = \Delta_{1_{\max}} f_1 + \Delta_{2_{\max}} f_2 = 23{,}1\,\mu m$
- Jeu interne minimum avant réduction : $j_{\text{int}_{\min}} = 2\,\mu m$ (classe « Normal »)
- Jeu interne maximum avant réduction : $j_{\text{int}_{\max}} = 13\,\mu m$

Les jeux internes après réduction peuvent maintenant être calculés :

- Jeu interne minimum après réduction = jeu interne minimum avant réduction - réduction maximale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\min}} = j_{\text{int}_{\min}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\max}} = 2 - 23{,}1 = -21{,}1\,\mu m$ mais le jeu ne peut pas être plus petit que 0, donc $j_{\text{int-ajust}_{\min}} = 0$. Attention : ceci indique la perte du jeu interne, ce qui conduit à une usure prématurée du roulement.
- Jeu interne maximum après réduction = jeu interne maximum avant réduction - réduction minimale :
  $j_{\text{int-ajust}_{\max}} = j_{\text{int}_{\max}} - \Delta r_{\text{ajust}_{\min}} = 13 - 0 = 13\,\mu m$.

Le jeu radial total est donc :
Minimum : $j_{\text{int-ajust}_{\min}} = 0\,\mu m$ ($j_{1_{\min}} < 0$ signifie qu'il n'y a pas de jeu)
Maximum : $j_{1_{\max}} + j_{2_{\min}} + j_{\text{int-ajust}_{\max}} = 12 + 3 + 13 = 28\,\mu m$ ($j_{2_{\min}} > 0$ signifie qu'il y a aussi du jeu entre la bague extérieure et le logement)

Solution 3i : Montage de roulements



LONGUEURS CORRIGÉES

$$l_1^* = l_1 + \frac{b}{2} - a$$

$$l_2^* = l_2 + 2a - b$$

MONTAGE EN O
ROULEMENTS APPARIÉS
SEPARÉS PAR DES DOUILLES
/!\ DILATATIONS THERMIQUES

Bague intérieure	☑ Charge tournante ☐ Charge fixe
Bague extérieure	☐ Charge tournante ☑ Charge fixe
Tolérances arbre et logement de gauche	**Ajustement bague extérieure dans logement** Tolérance du logement : H7 (0 +25) Jeu théorique min : $j_{2_{\min}} = 0\,\mu m$ Jeu théorique max : $j_{2_{\max}} = 36\,\mu m$ **Ajustement bague intérieure sur arbre** Tolérance de l'arbre : js5 (+4 -4) Serrage théorique min : $j_{1_{\min}} = 4\,\mu m$ Serrage théorique max : $j_{1_{\max}} = -12\,\mu m$
Tolérances arbre et logement de droite	Idem au roulement de gauche
Force axiale côté gauche	Selon précharge : classe GB 30 à 330 N (On néglige l'effet des charges radiales)
Force radiale côté gauche	$F_y \cdot \frac{l_1^*}{l_2^*}$
Force axiale côté droit	Selon précharge : classe GB 30 à 330 N (On néglige l'effet des charges radiales)
Force radiale côté droit	$F_y \cdot \frac{l_1^*+l_2^*}{l_2^*}$
Jeu radial	Min : $0\,\mu m$ Max : $40\,\mu m$ (Calcul idem à l'exercice 6, côté droit)