

Éléments de Machine
Cours de Construction Mécanique
Première Année
Sections MicroTechnique et Génie Mécanique

14 séances:

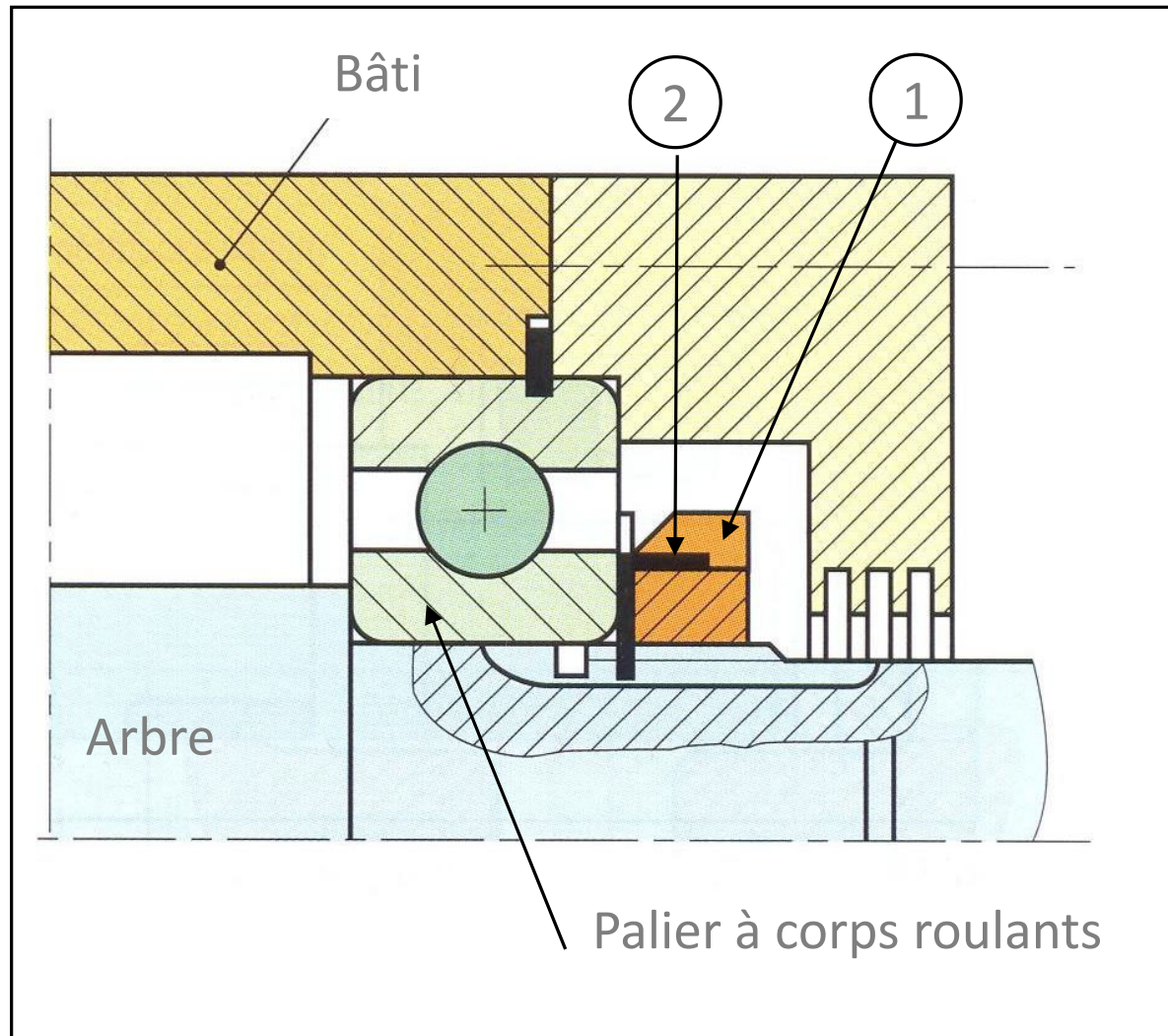
1. Introduction
2. Cycle de Vie – Matériaux, Produit et Développement
3. Energie & Puissance
4. Matériaux
5. Frottement
6. **Guidages**
7. Accouplements
8. Transmission de Mouvement et de Couple
9. Transformation de Mouvement
10. Ressorts

6. Guidages

1. Rappels – Liaison et Degrés de Liberté
2. Introduction aux Guidages
3. Guidages Lisses
 1. Guidages en Rotation – Paliers Lisses, Coussinets, Rotules
 2. Guidages en Translation – Glissières à Frottement
4. Guidages Roulants
 1. Guidages en Rotation - Roulements
 2. Guidages en Translation – avec Éléments Roulants
5. Guidages sans contact

- Les degrés de liberté sont les **6 paramètres indépendants** qu'il est nécessaire d'imposer pour fixer uniquement la position d'un solide dans un référentiel absolu.
- En mécanique: une liaison est un élément (une intervention) externe qui retire un ou plusieurs degrés de liberté à un solide

Exemple : montage d'un arbre



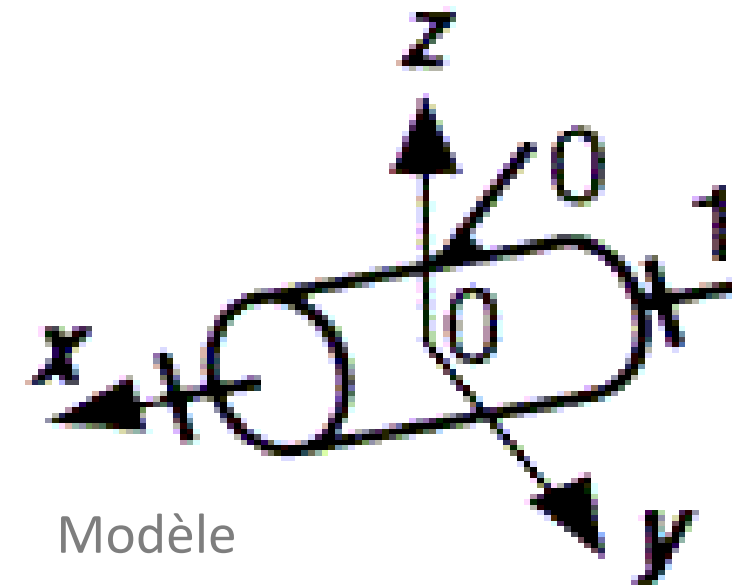
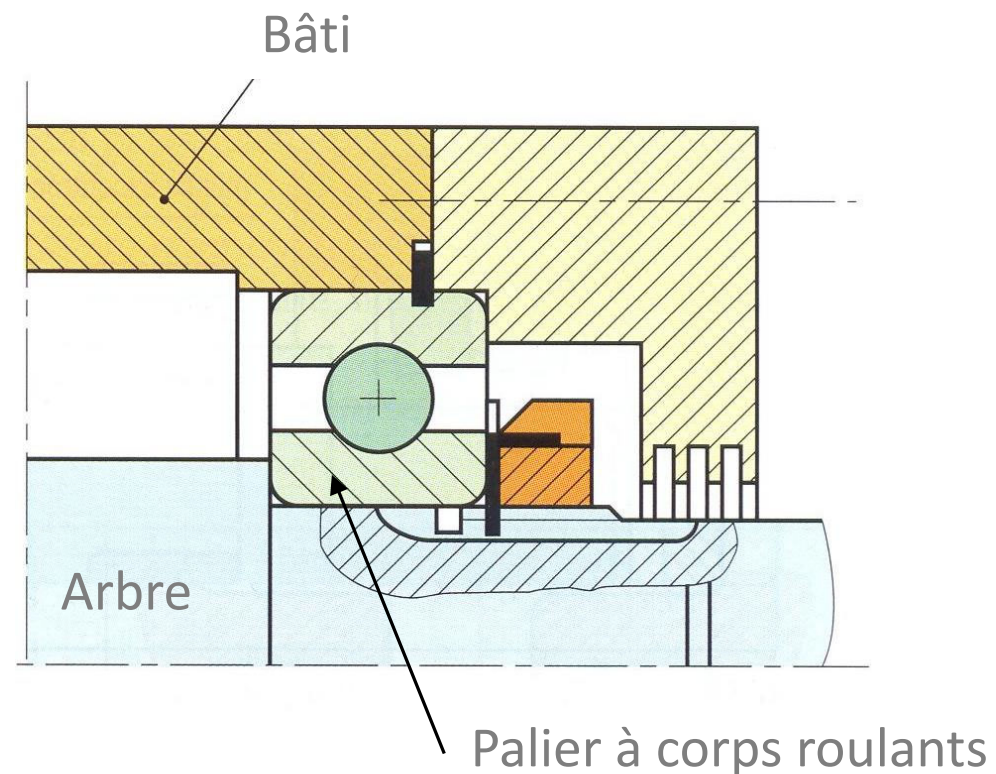
- Quelle est la fonction:
 - Du palier à corps roulants dans ce montage?
 - De la pièce 1?
 - De la pièce 2?

Exemple : montage d'un arbre



Liaison pivot – **Fonction:**

- Retire 5 DDL, rotation libre (cinématique)
- Impose/reprend cinq efforts - Couple selon x libre (statique)



Liaisons normalisées

| Symboles des liaisons mécaniques NF EN 23952 / ISO 3952-1 NF EN ISO 3952-1 | | | | | | |
|--|---|-----------|-------------------|---|-------------------------------|---------|
| Nom de la liaison | Translations | Rotations | Degrés de liberté | Principales représentations planes (orthogonales) | Représentation en perspective | Exemple |
| Encastrement ou liaison fixe | 0 | 0 | 0 | variante 1 variante 2 | | |
| Pivot | 0 | 1 | 1 | | | |
| Glissière | 1 | 0 | 1 | | | |
| Hélicoïdale | 1 + 1 Combinées (fonction du pas) | 1 | 2 | | | |
| Pivot glissant | 1 | 1 | 2 | | | |
| Sphérique ou rotule à doigt | 0 | 2 | 2 | | | |

| Symboles des liaisons mécaniques NF EN 23952 / ISO 3952-1 NF EN ISO 3952-1 | | | | | | |
|--|--------------|-----------|-------------------|---|-------------------------------|---------|
| Nom de la liaison | Translations | Rotations | Degrés de liberté | Principales représentations planes (orthogonales) | Représentation en perspective | Exemple |
| Rotule ou sphérique | 0 | 3 | 3 | | | |
| Appui plan | 2 | 1 | 3 | | | |
| Linéaire rectiligne * | 2 | 2 | 4 | | | |
| Sphère cylindre ou linéaire annulaire | 1 | 3 | 4 | | | |
| Sphère-plan ou ponctuelle | 2 | 3 | 5 | | | |

(*) ancienne normalisation NF E 04-015.

Depuis **l'invention de la roue**, différents types de paliers ont été mis au point à travers les âges :

- palier lisse en bois
- palier à coussinets de bronze
- roulement à billes d'acier
- palier à air
- etc.



chacun répondant aux besoins des machines de son époque, mais tous remplissant les mêmes fonctions fondamentales.



Tour de potier



1ere roue 70cm

env. 3000 avant J.C.

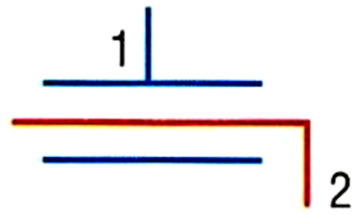

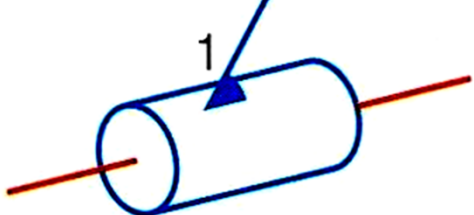
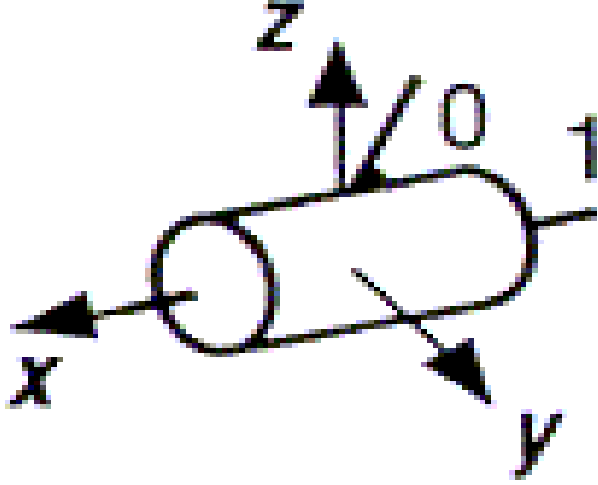
Guidages:

- Rotation
- Translation
- Par Glissement
- Par Roulement

Paliers = Guide de rotation:

- Lisses = arbres sur des coussinets avec frottement de glissement entre surfaces contact
- Roulant ou à roulement = contact par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux dans des cages avec frottement de roulement (plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation)
- Sans Contact

Liaison normalisée: pivot glissant

| | | | | | | |
|---|---|----------|-----|---|---|---|
| Pivot glissant | 1 | 1 | 2 |  |  |  |
| | Translation | Rotation | DDL | Torseur cinématique | | |
| Pas de frottement Pas de jeu Géométrie parfaite |  | | | | | |
| | $V_{1/0} = \left\{ \begin{matrix} \Omega_x & V_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\}_0$ | | | | | |
| | <div> <div>Rotation</div> <div>Translation</div> </div> | | | | | |



Coussinets

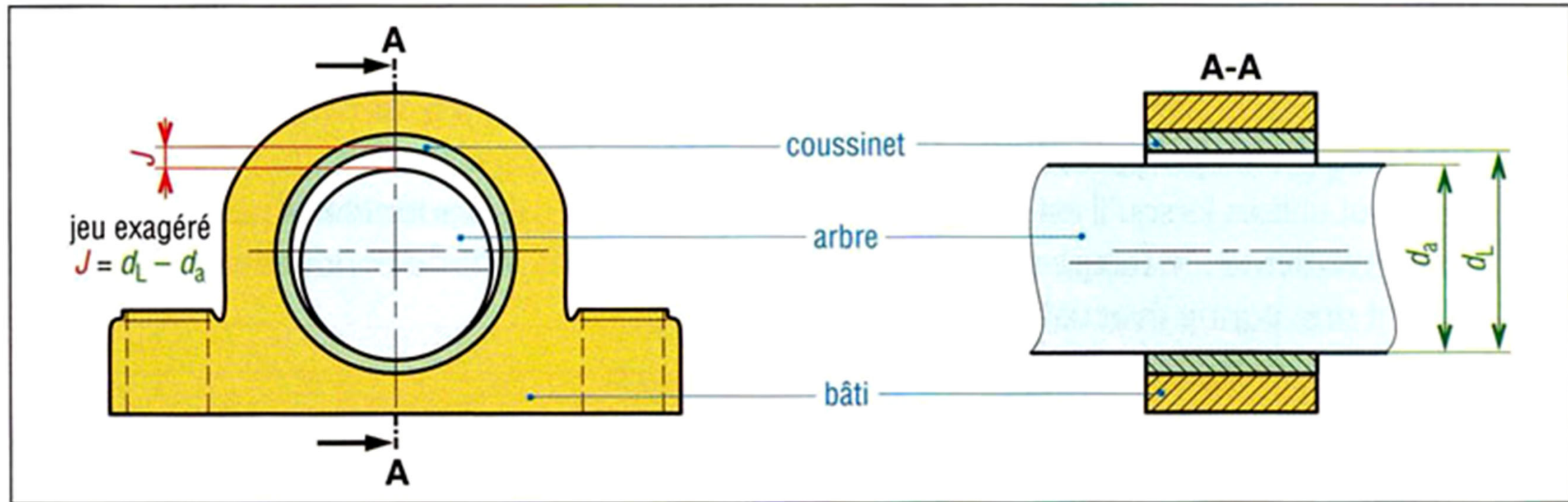
<http://www.ggbearings.com/en>

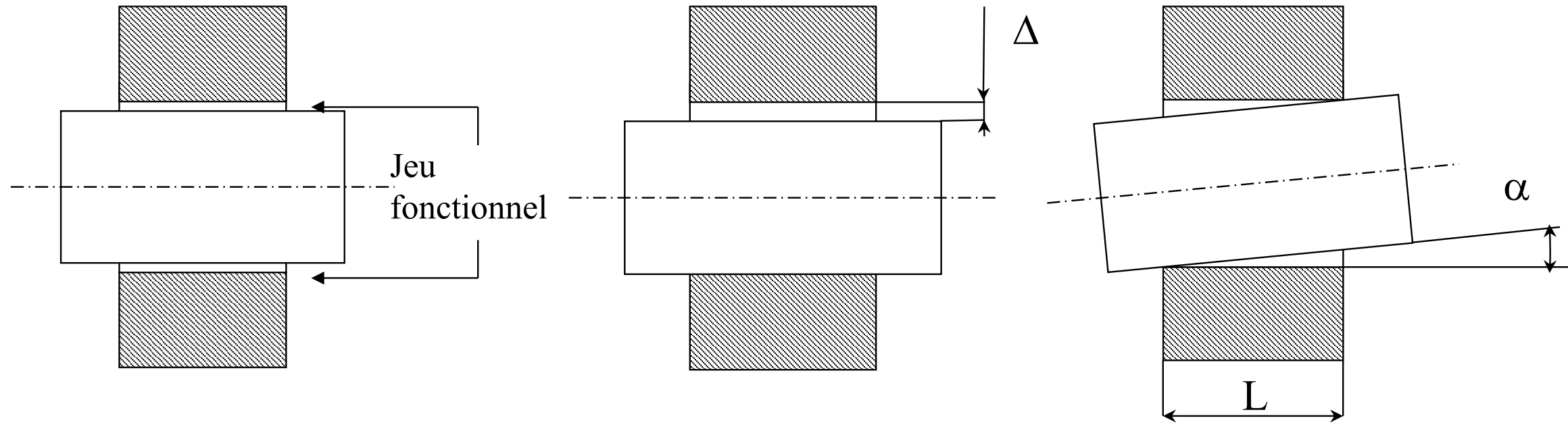


http://www.soltri.com/eng/htm/sub1_1.asp#

Paliers lisses radiaux = bagues cylindriques, coussinets
Paliers lisses axiaux = butées lisses

Principe et géométrie





25 H7 D maxi = 25,021
D mini = 25,000
25 g6 d maxi = 24,993
d mini = 24,982

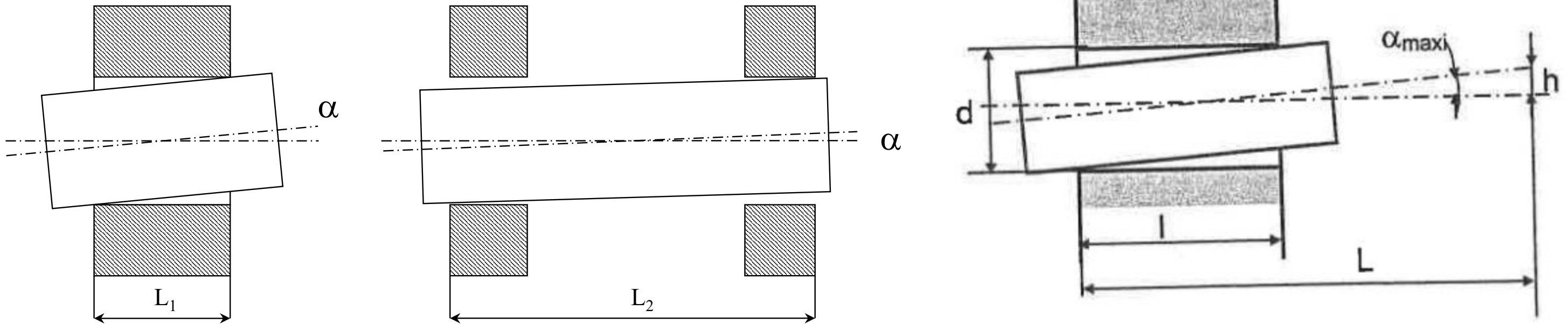
$$\Delta = D - d$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D - d}{L}$$

$$\Delta = 7 \text{ à } 39 \mu\text{m}$$

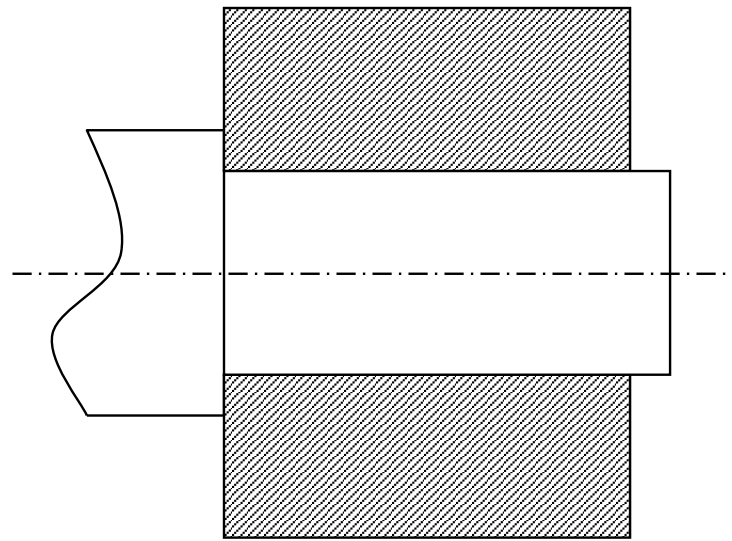
$$\alpha = 1 \text{ à } 6 ^\circ$$

Liaison pivot glissant – Palier

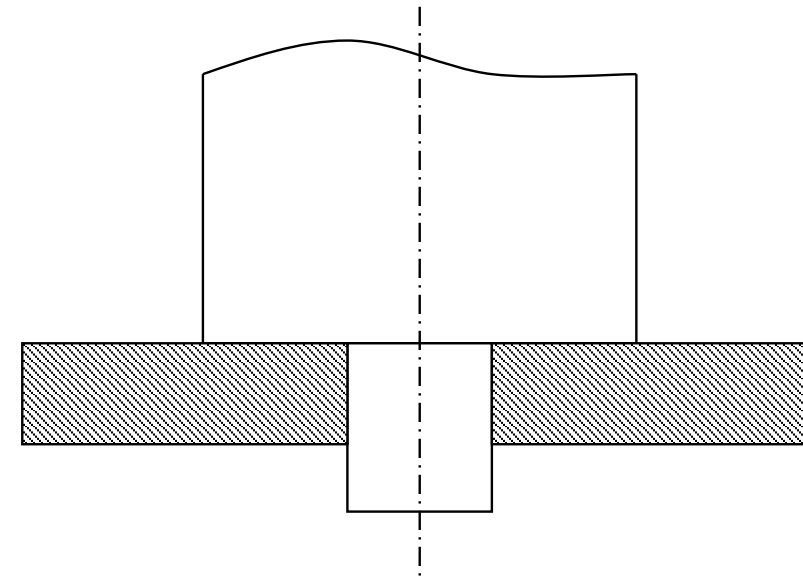


Si 1 palier long ne suffit pas (dès que $l > 1.5d$) pour limiter α (et h), alors 2 paliers courts ($l < 0.5d$) sont nécessaires.

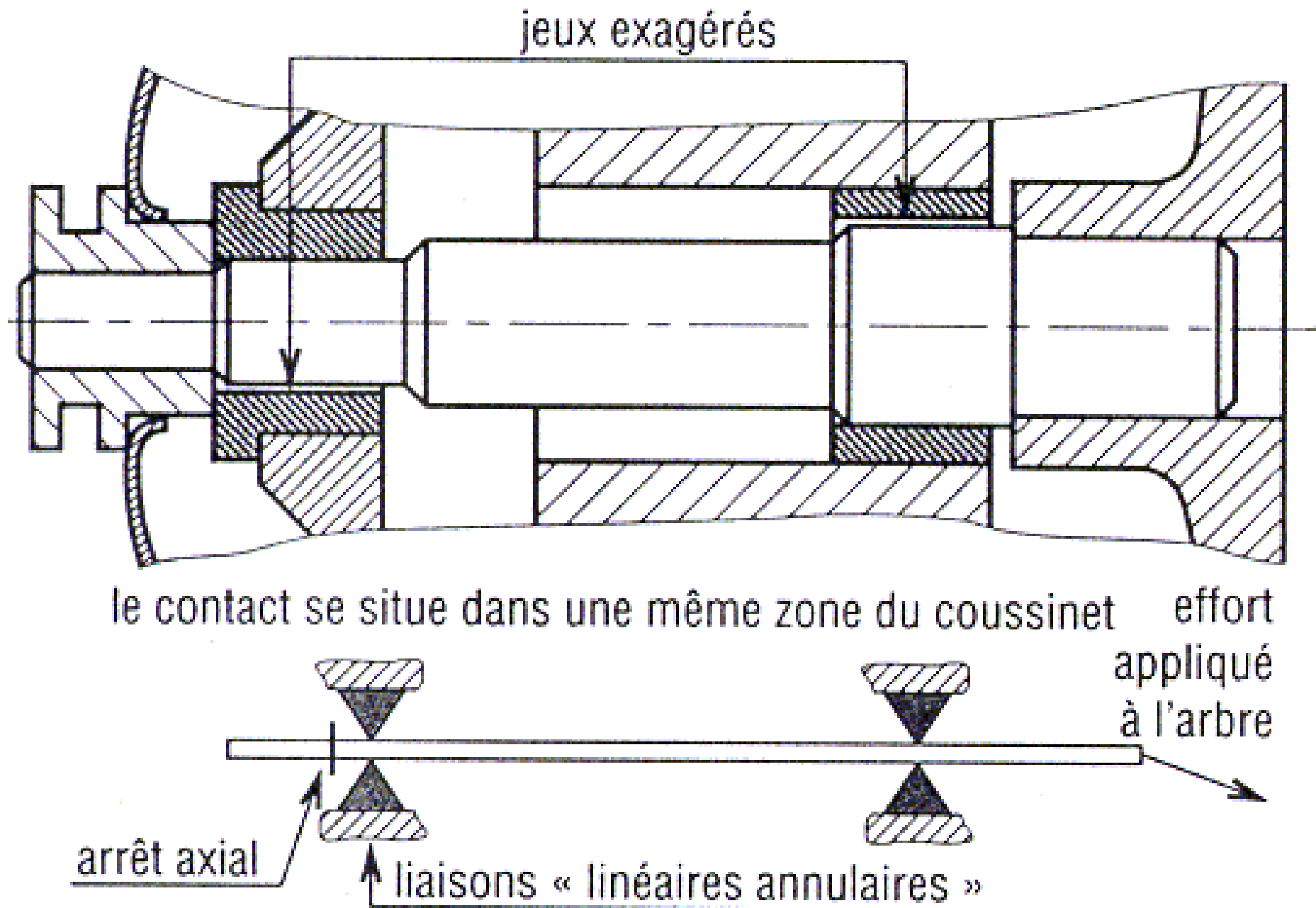
Liaison pivot – Palier et butée



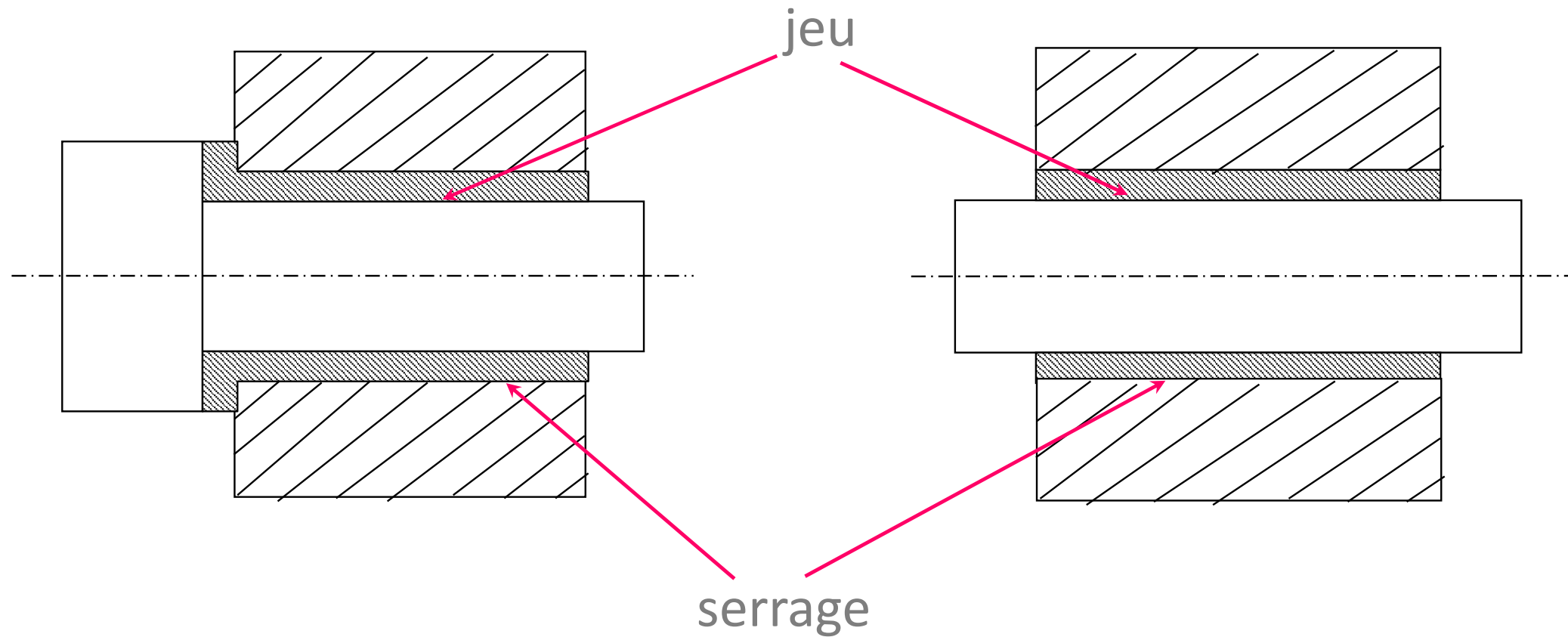
pivot glissant
+
ponctuelle ou plane



plane
+
linéaire circulaire

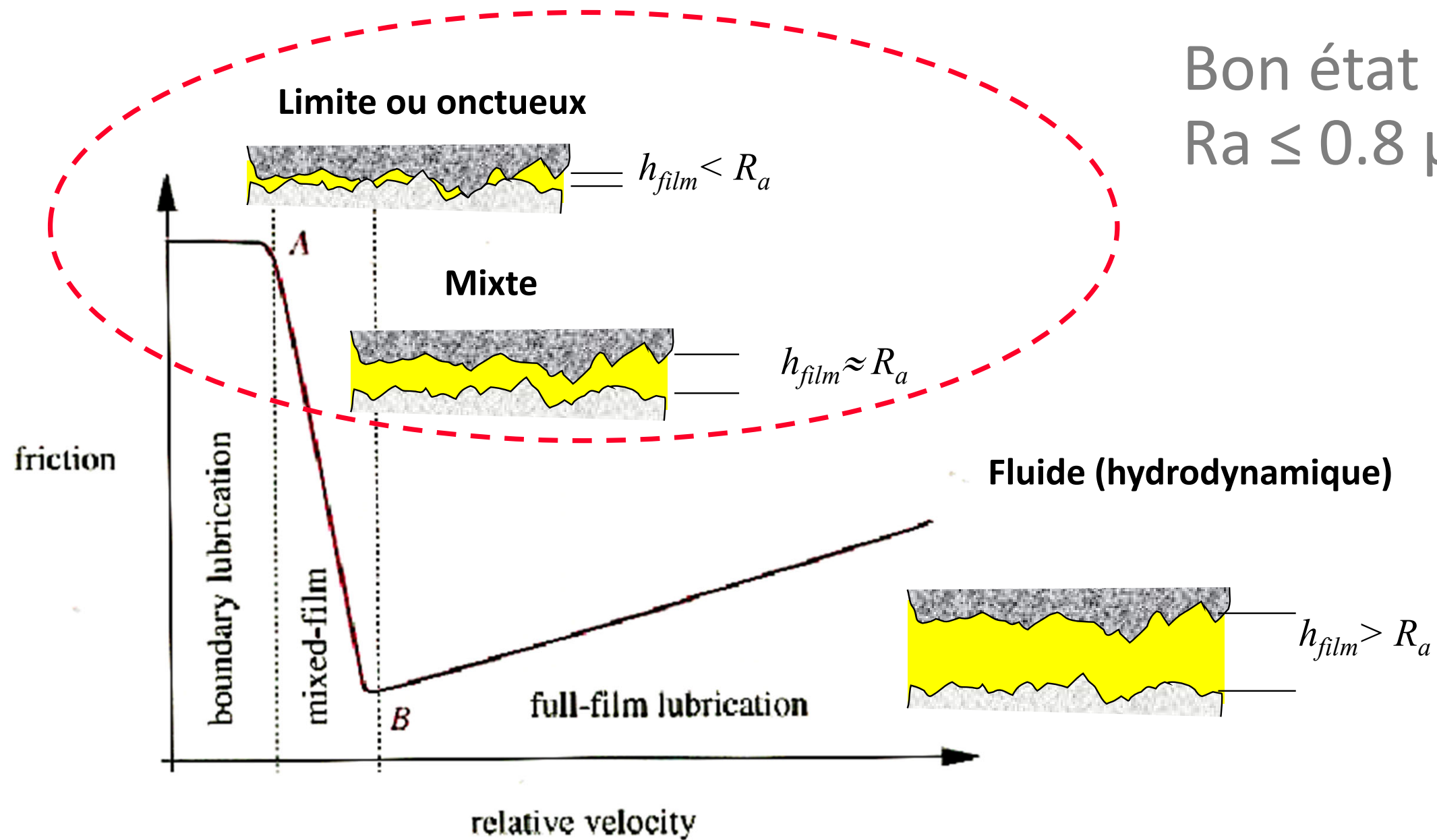


Principe

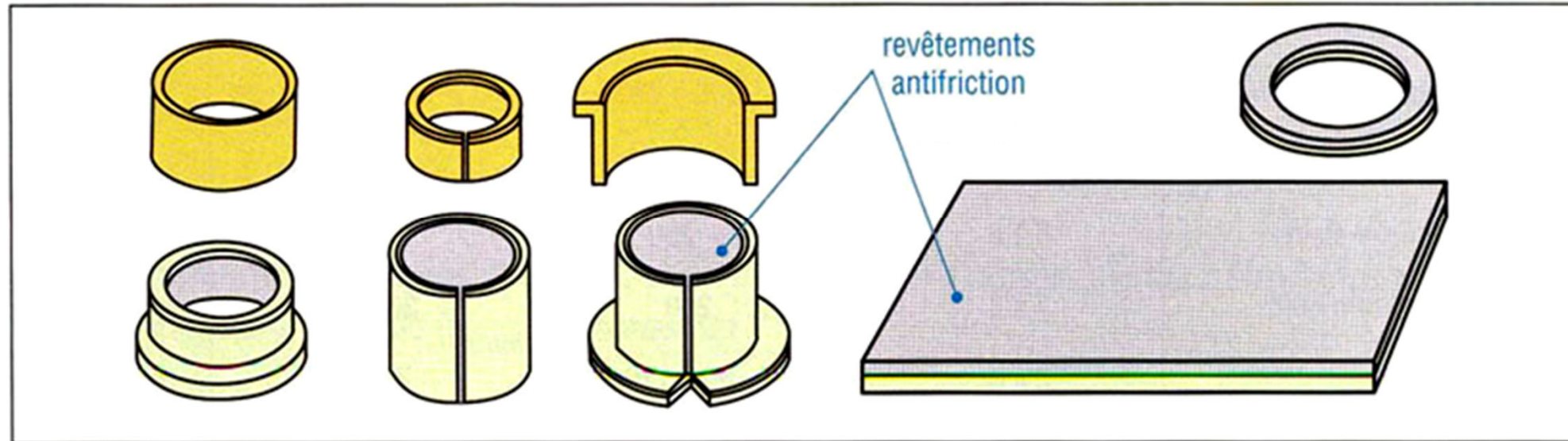


Serrage sauf grande vitesse: les coussinets tournent mais usure rapide

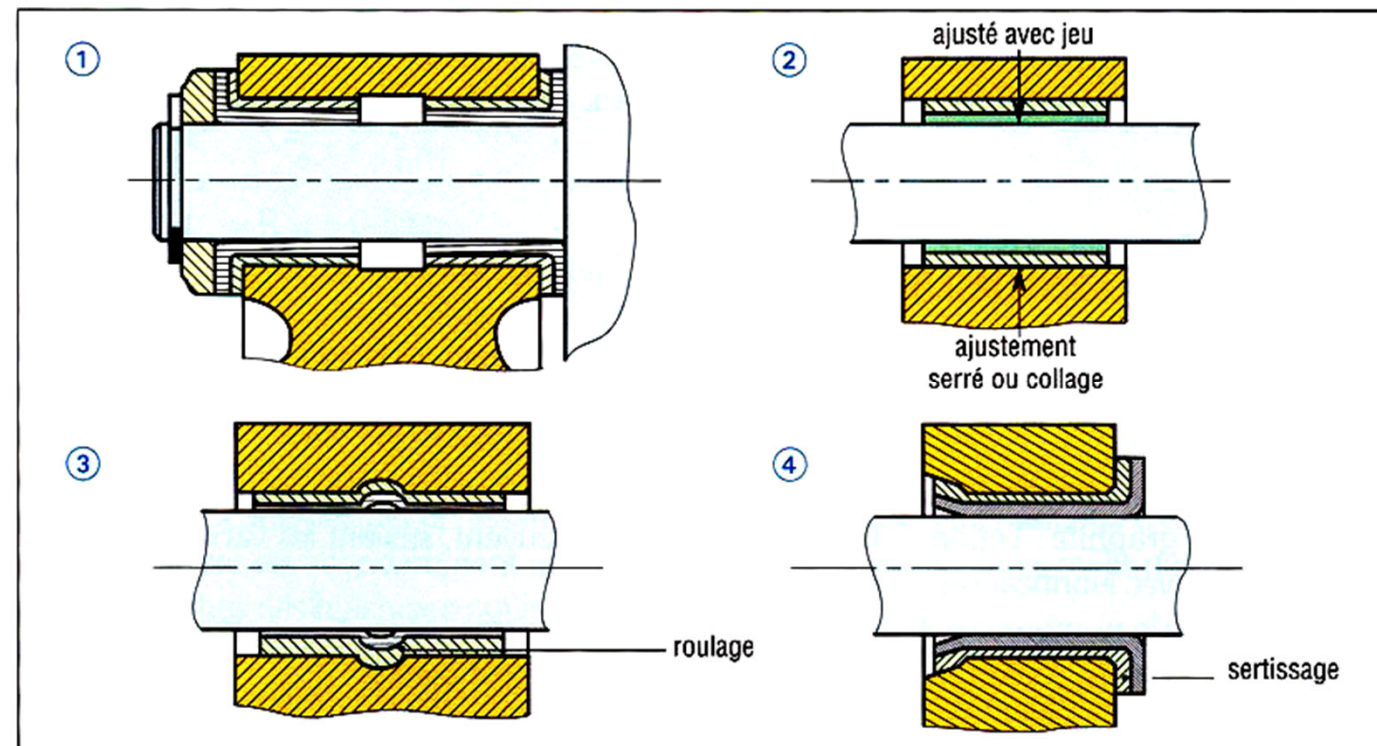
Régimes de lubrification – Guidage avec Frottement



Types et montages



- Coussinets
 - Autolubrifiants
 - Composites, glacier



Matériaux – Attention au grippage arbre/coussinet

Grippage:

| | |
|-----------|-----------|
| Acier | Aluminium |
| Acier | Chrome |
| Acier | Nickel |
| Aluminium | Aluminium |
| Aluminium | Argent |
| Aluminium | Chrome |
| Aluminium | Nickel |
| Aluminium | Cuivre |
| Cuivre | Argent |
| Cuivre | Chrome |
| Cuivre | Etain |
| Cuivre | Nickel |

Bonne résistance au grippage:

| | |
|-------|-----------|
| Acier | Antimoine |
| Acier | Argent |
| Acier | Bronze |
| Acier | Etain |

Matériaux:

- Bon état de surface
- Résistance au grippage
- Compatibilité lubrifiant
- Faible coefficient de frottement
- Usure minimale et progressive
- Facilement remplaçable

Bagues roulées:

- Bande d'acier + revêtement roulée
- Fente: montage facile, réserve de lubrifiant

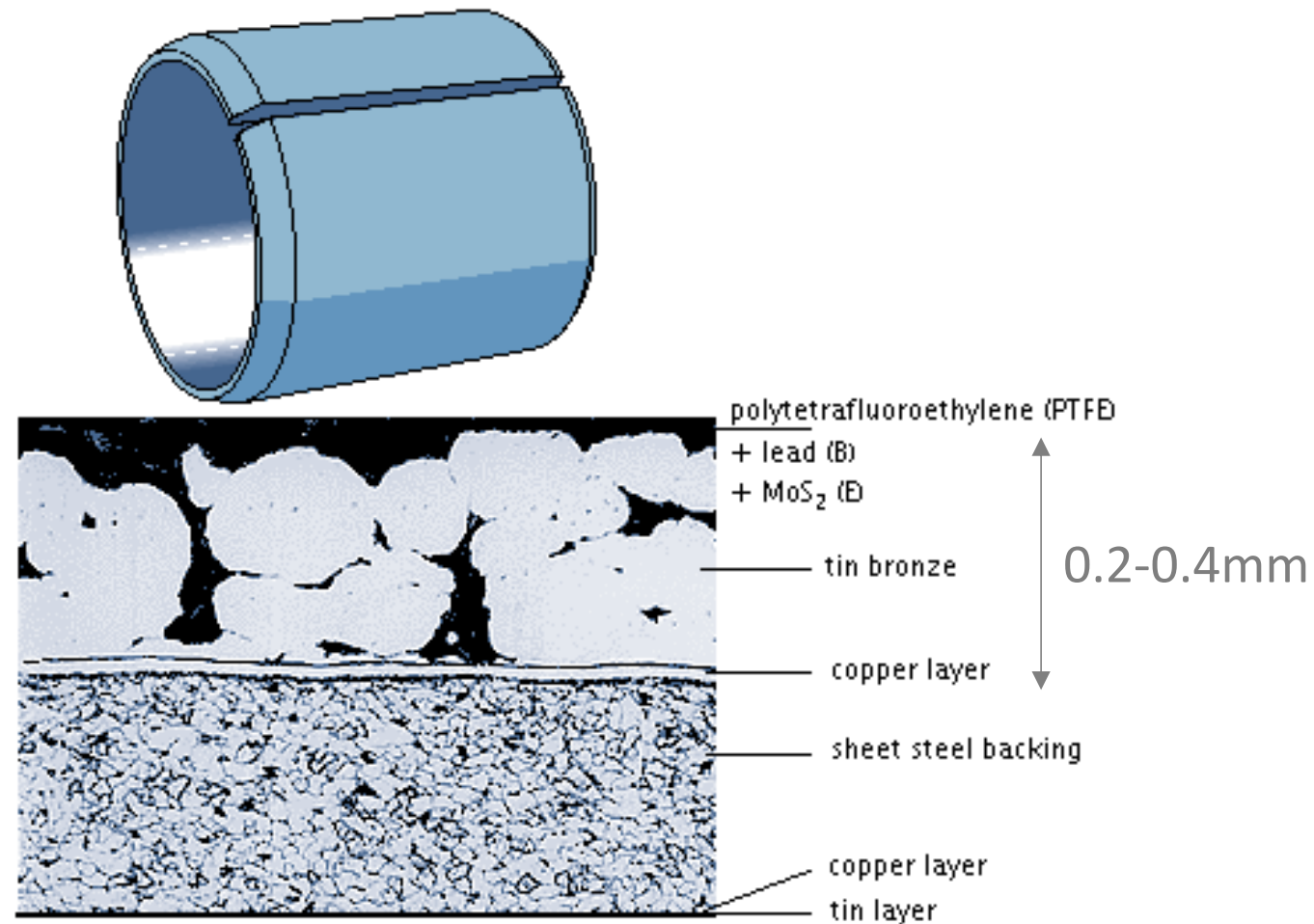


Coussinets frittés:

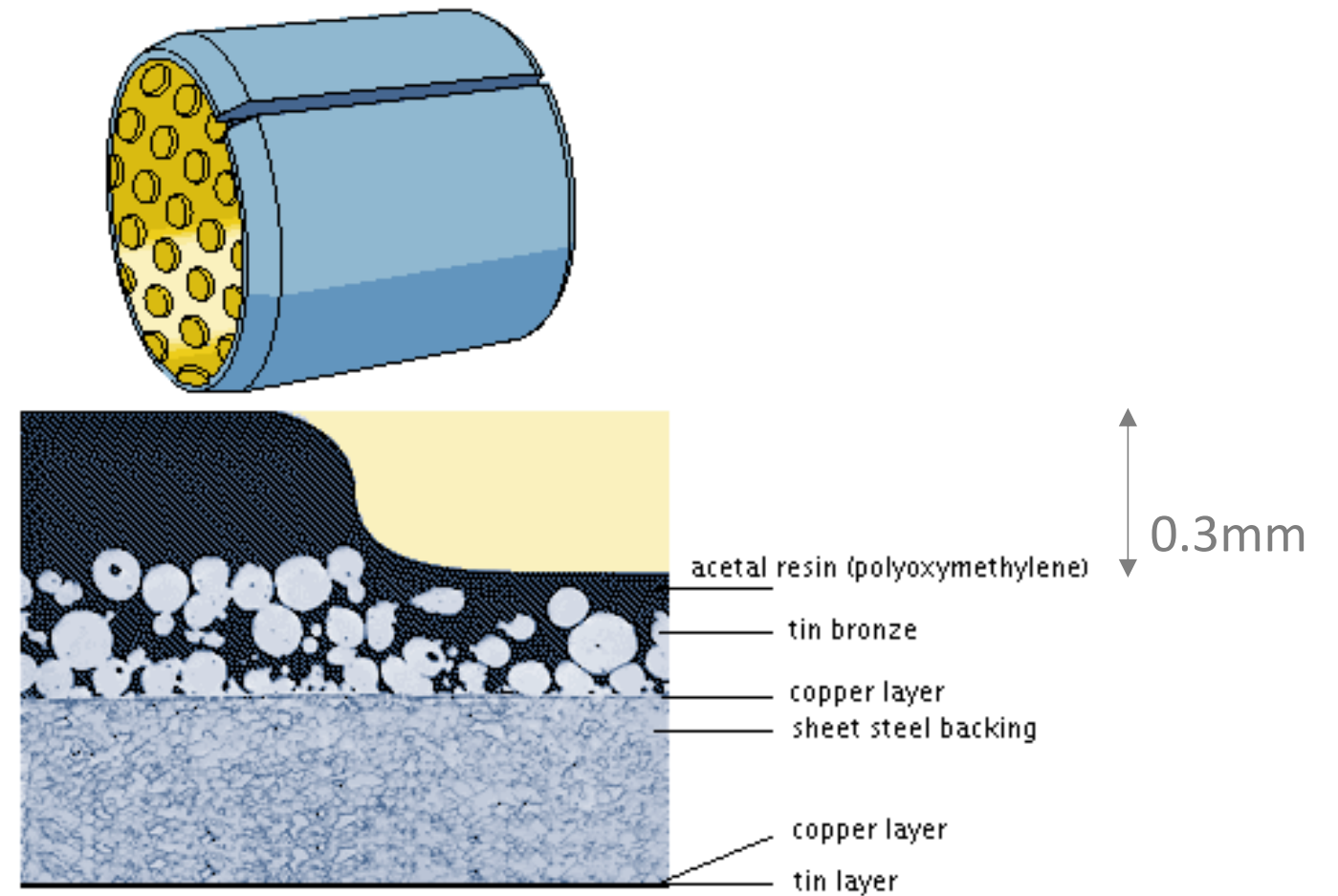
- Poreux dits autolubrifiants
- Bronze (Cu+Sn (étain)) ou alliages ferreux
- Montage par frettage (montage presse)
- Coefficient de frottement hydrodynamique 0.01-0.08
- Vitesses 0.3-6m/s – Pressions < 100MPa – Températures -20-100°C
- Graphite jusqu'à 13m/s



Matériaux



Glycodur F (Glacier PTFE)



Glycodur A/AB (Glacier acétal)

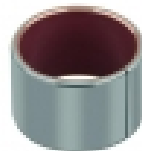
Matériaux

Metal-Polymer



DP4™

DP10™
DP11™
DP31™



DTS10™

DP4-B™
DS™
DU-B™



DX®

DU®
DX®10
HI-EX®

Solid Polymer



EP22™

EP12™
EP44™
EP64™



EP43™

EP73™
EP79™
EP™



EP63™

KA™
Glacetal
Multilube™

Filament Wound



HSG™

GAR-FIL®
HPF™
HPM™



GAR-MAX®

MLG™
Multifil™
SBC™ with
GAR-MAX®



MEGALIFE®
XT

SBC™ with
HSG™

Bushing Blocks and Thrust Plates



PICAL 2™

PICAL 3™



SICAL 3D™



SICAL 3™

Metals and Bimetals



DB™

GGB-CBM™
LDD™
LD™



GGB-CSM™

MBZ-B09™
Sintered
Bronze



SY™

Solid Bronze
SP™

Assemblies



EXALIGN™

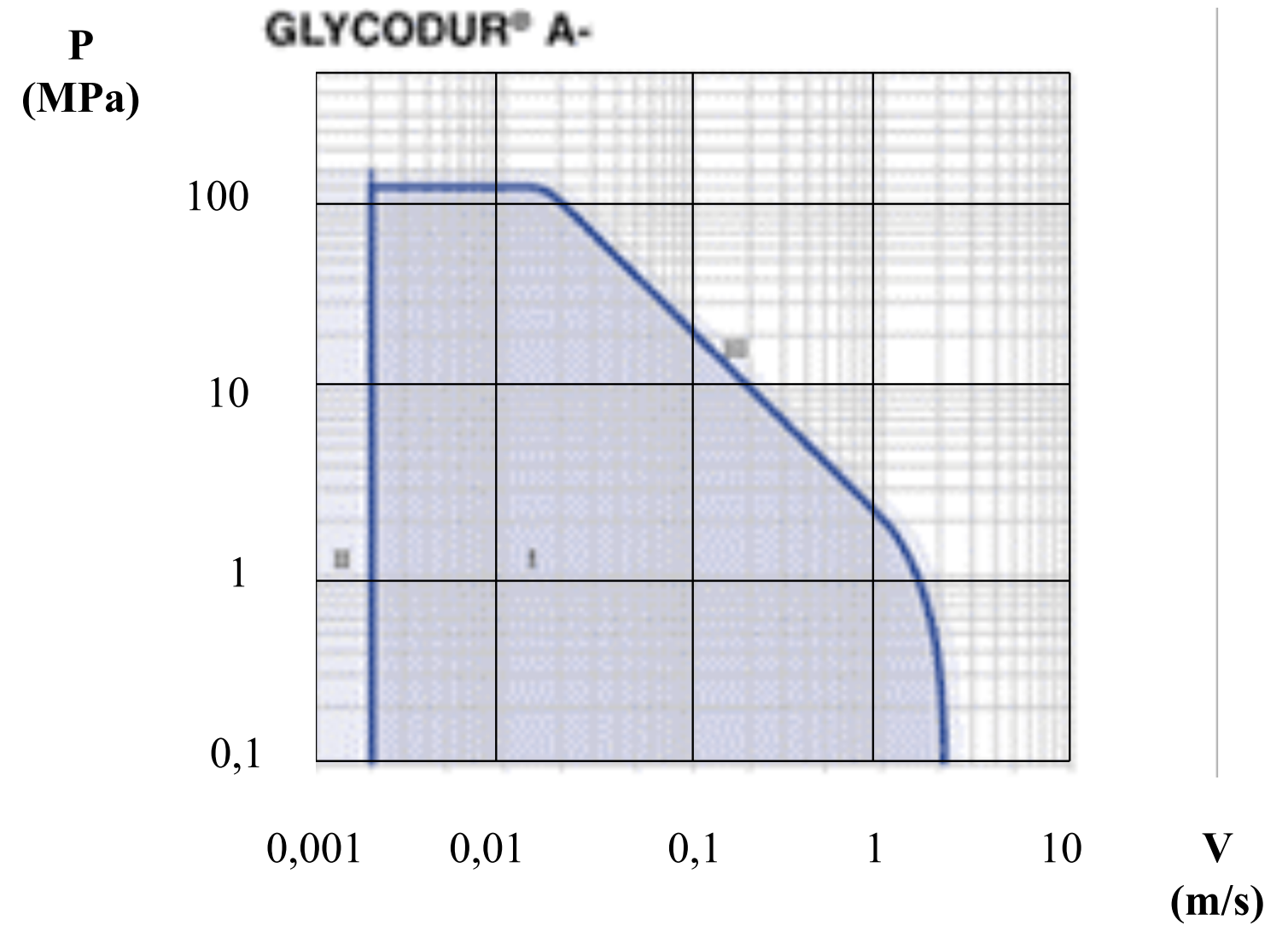


MINI™

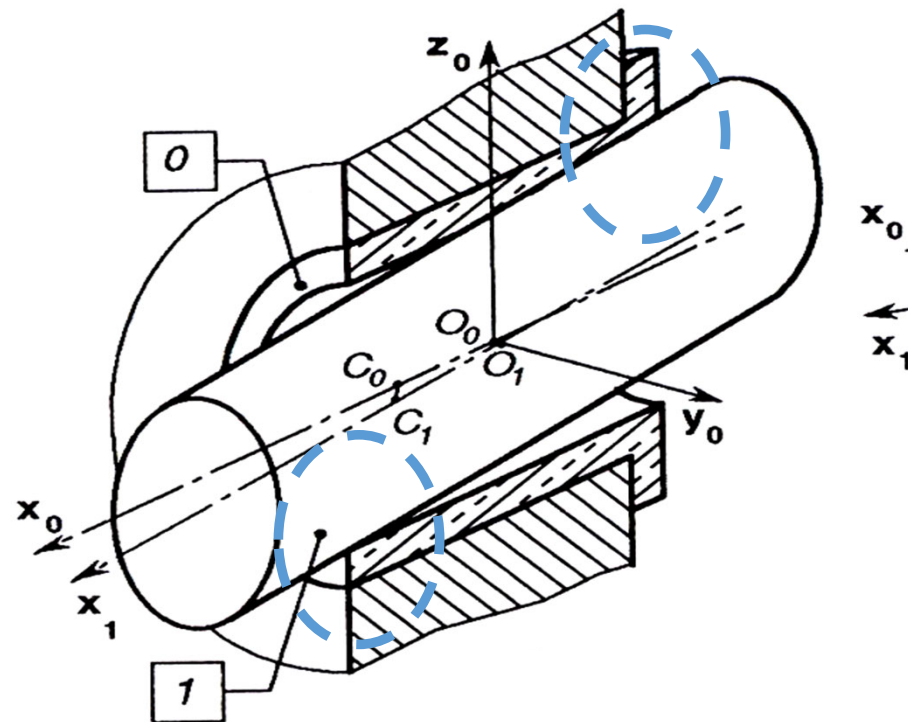


UNI™

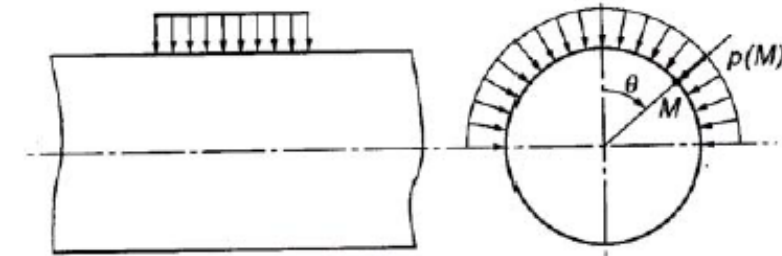
Domaine d'application:



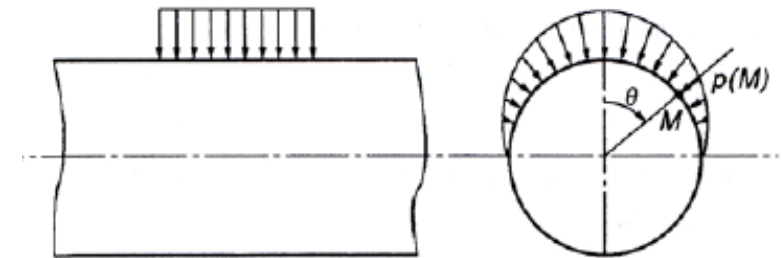
Positionnement de l'arbre dans le palier et distribution de pression



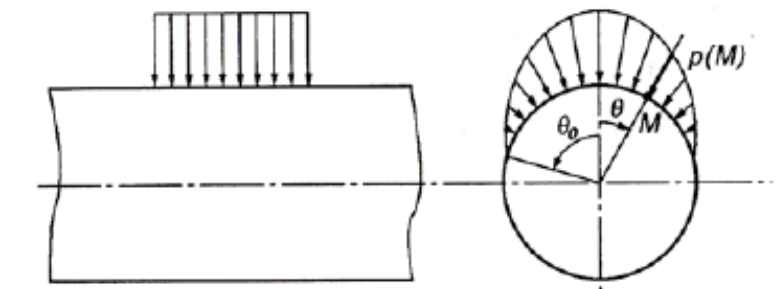
Modèle 1



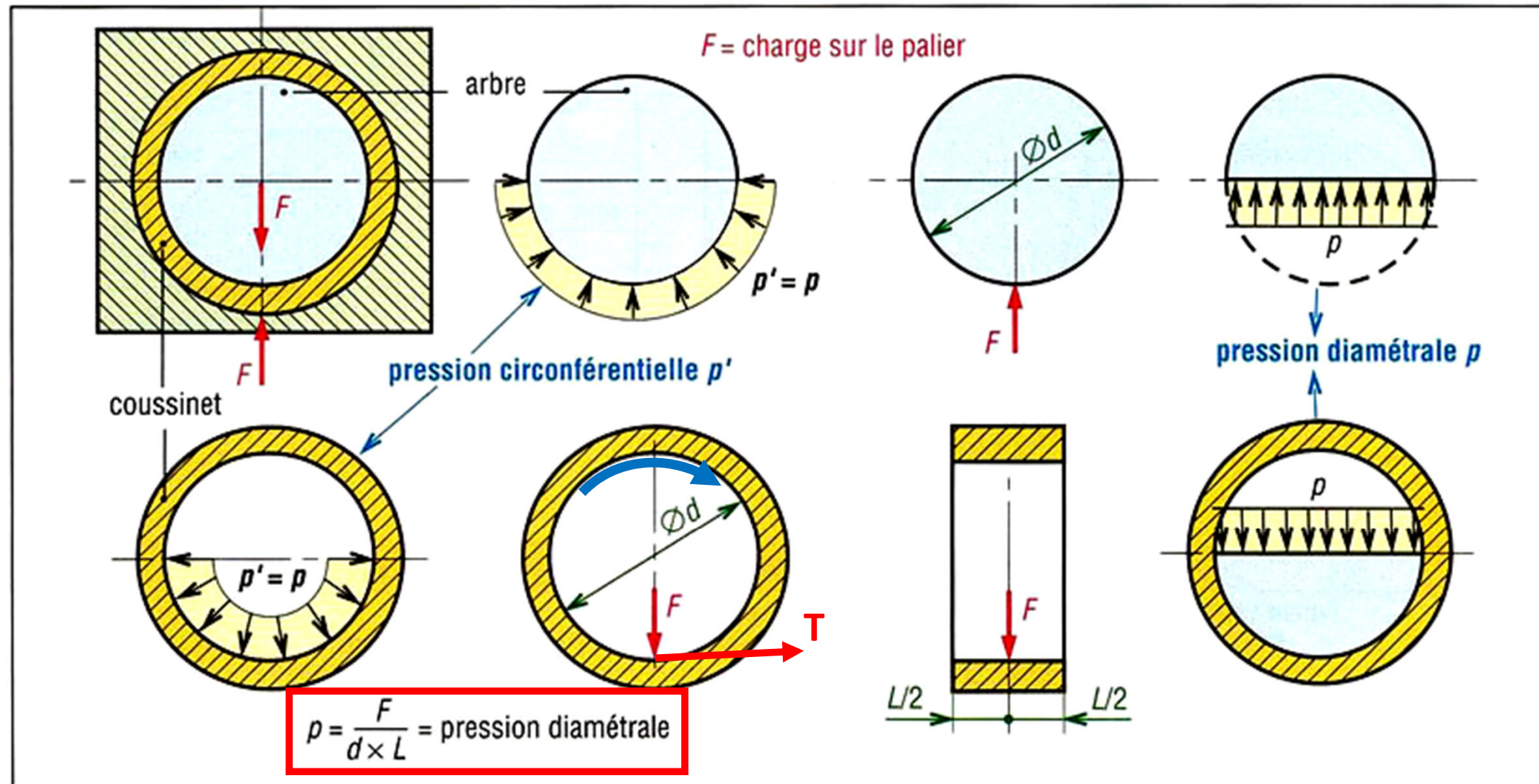
Modèle 2



Modèle 3



- Distribution de pression : modèle grossier, pression diamétrale
- La force radiale F donne une pression diamétrale p .
- La force radiale F donne une force tangentielle de friction $T = \mu F$ résistante (opposée) au mouvement.

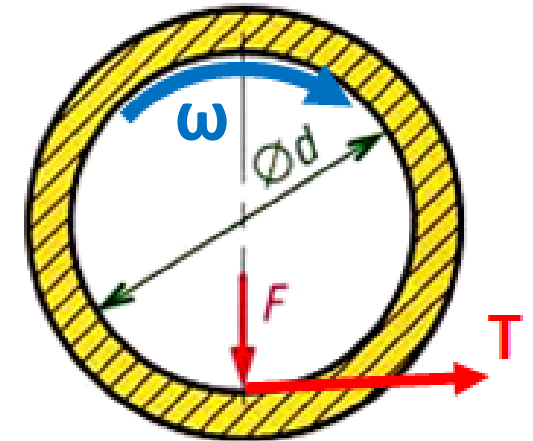


Éléments de calcul des coussinets en régime onctueux

- Paramètre de fonctionnement
 - Pression diamétrale (MPa):
 - Vitesse circonférentielle (m/s):
 - Facteur ou produit pV (W/m^2) \rightarrow ~puissance spécifique dissipée
- Paramètre résultant: T température d'interface ($^{\circ}\text{C}$)
- Coefficient de frottement:
- Surface de contact sur la moitié du coussinet:
- Force de frottement tangentielle:
- Puissance dissipée par frottement dans le coussinet:

$$p = \frac{F}{dL}$$

$$V = \omega \frac{d}{2}$$



$$\mu$$

$$A = \frac{\pi dL}{2}$$

$$T = \mu F = \mu p A = \mu \frac{F}{dL} \frac{\pi dL}{2} = \mu \pi \frac{F}{2}$$

$$P = T \cdot V = \mu \cdot \pi \cdot \frac{F}{2} \cdot \omega \cdot \frac{d}{2} = \mu F \pi \omega \frac{d}{4}$$

$$P = \mu F \pi \omega \frac{d}{4}$$

- Taux d'usure proportionnel à pV

Performances

| Performances indicatives comparatives des coussinets usuels | | | | |
|---|-------------------------------|---|--|---|
| type du coussinet | vitesse maxi admissible (m/s) | températures limites de fonctionnement (°C) | pression admissible en fonctionnement (N/mm ²) | produit pV admissible (N/mm ²). (m/s) |
| glacier acétal | 2 à 3 | – 40 à 110 | 70 | 3 |
| glacier PTFE | 2 à 3 | –200 à 280 | 50 | 1,8 à 3,6 |
| graphite | 13 | 400 | 5 | 0,5 |
| bronze-étain | 7 à 8 | > 250 | 7 à 35 | 1,7 |
| bronze-plomb | 7 à 8 | 250 | 20 à 30 | 1,8 à 2,1 |
| Nylon | 2 à 3 | –80 à 120 | 7 à 10 | 0,1 à 0,3 |
| acétal | 2 à 3 | –40 à 100 | 7 à 10 | 0,1 |

| Coussinets glacier usuels : performances indicatives | | | | | | |
|---|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|---|
| Type fonctionnement | Composition | Températures d'utilisation | Pression statique admissible | Vitesse maximale admissible | Produit p_v maxi N/mm ² · m/s | Exemple |
| Glacier PTFE : sans entretien à sec | PTFE + Pb + bronze... | – 200 à 280° C | 250 N/mm ² | 2 à 3 m/s | $p_{v, \text{continu}}$: 1,8 $p_{v, \text{temporaire}}$: 3,6 ($p < 140 \text{ N/mm}^2$) | INA : permaglides P1 SIC : DU SKF : glycodur F... |
| Glacier acétal : entretien réduit, avec lubrification | résine acétal, PVDF, PTFE, Pb, bronze... | – 40 à 110° C | 250 N/mm ² | 2 à 3 m/s | $p_{v, \text{continu}}$: 3 ($p < 140 \text{ N/mm}^2$) | INA : permaglides P2 SIC : DX SKF : glycodur A... |

Exemple de Coussinet en Bronze



| | |
|----------------|--------------------|
| Cuivre | 87,5 – 90,5 |
| Fer | 1,0 max |
| Plomb | |
| Carbone | 1,75 max |
| Etain | 9,5 – 10,5 |
| Autres | 0,05 |

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| Densité (g/cm³) | 6,4 – 6,8 |
| Limite élastique (MPa) | 100 |
| Porosité (%) | 19 mini |
| P V max (MPa . m/min) | 100 |

Exemple de Coussinet en Acier + Revêtement Bronze PTFE



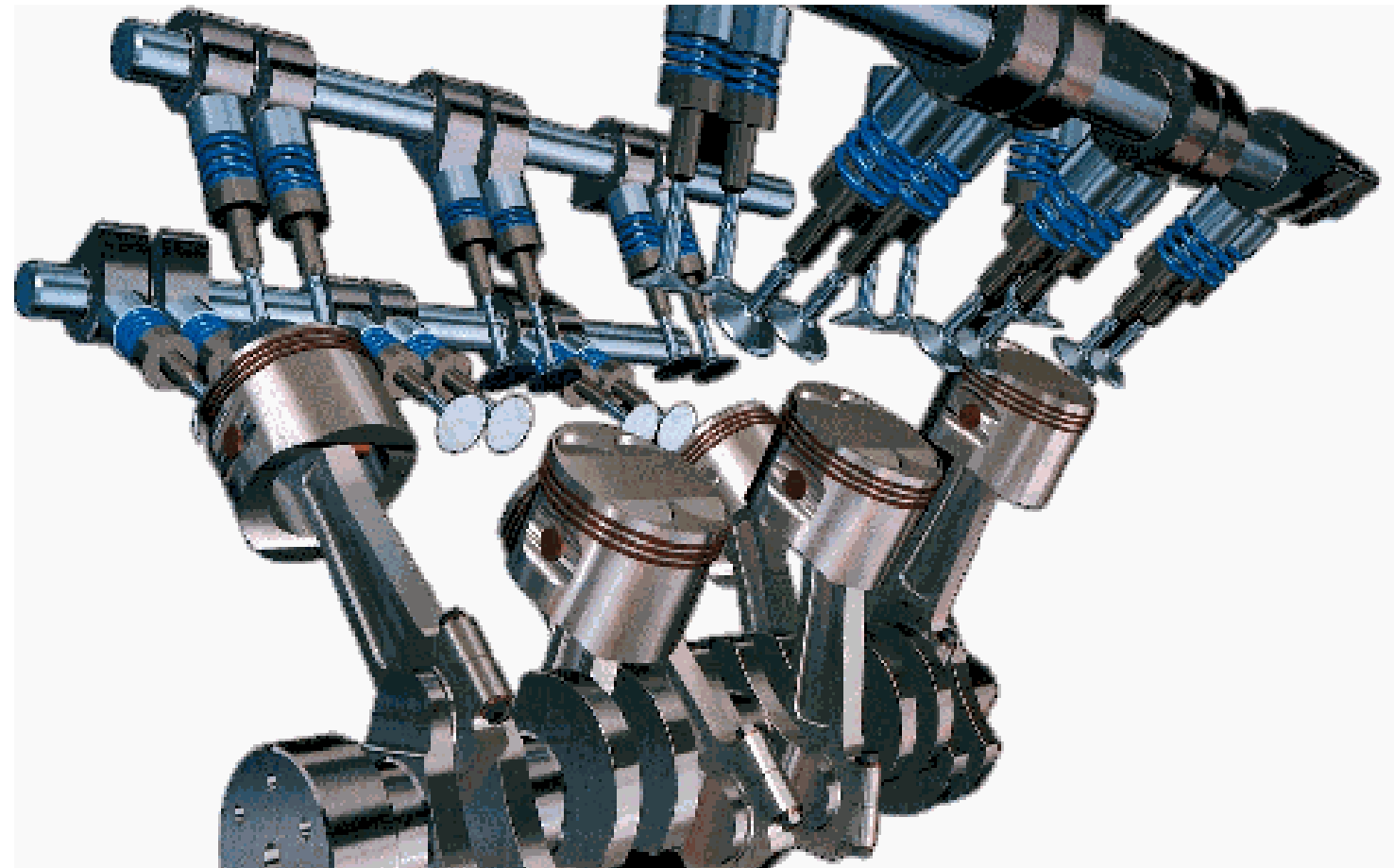
Acier
Bronze
Téflon (PTFE)

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Température (°C) | - 240 / + 290 |
| Vitesse (m/min) | 300 maxi |
| Pression (MPa) | 140 maxi |
| P V max (MPa . m/min) | 100 (à sec) 600 (lubrifié) |

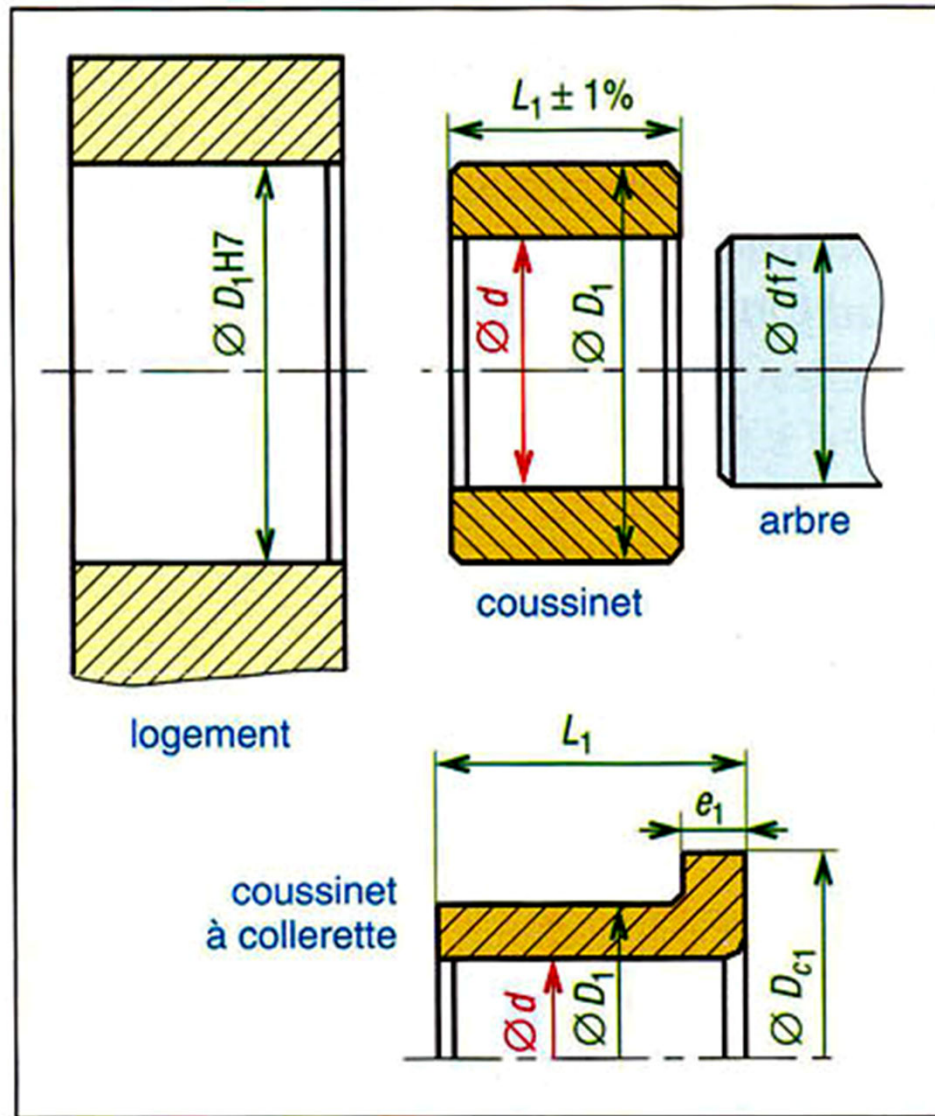
Usure



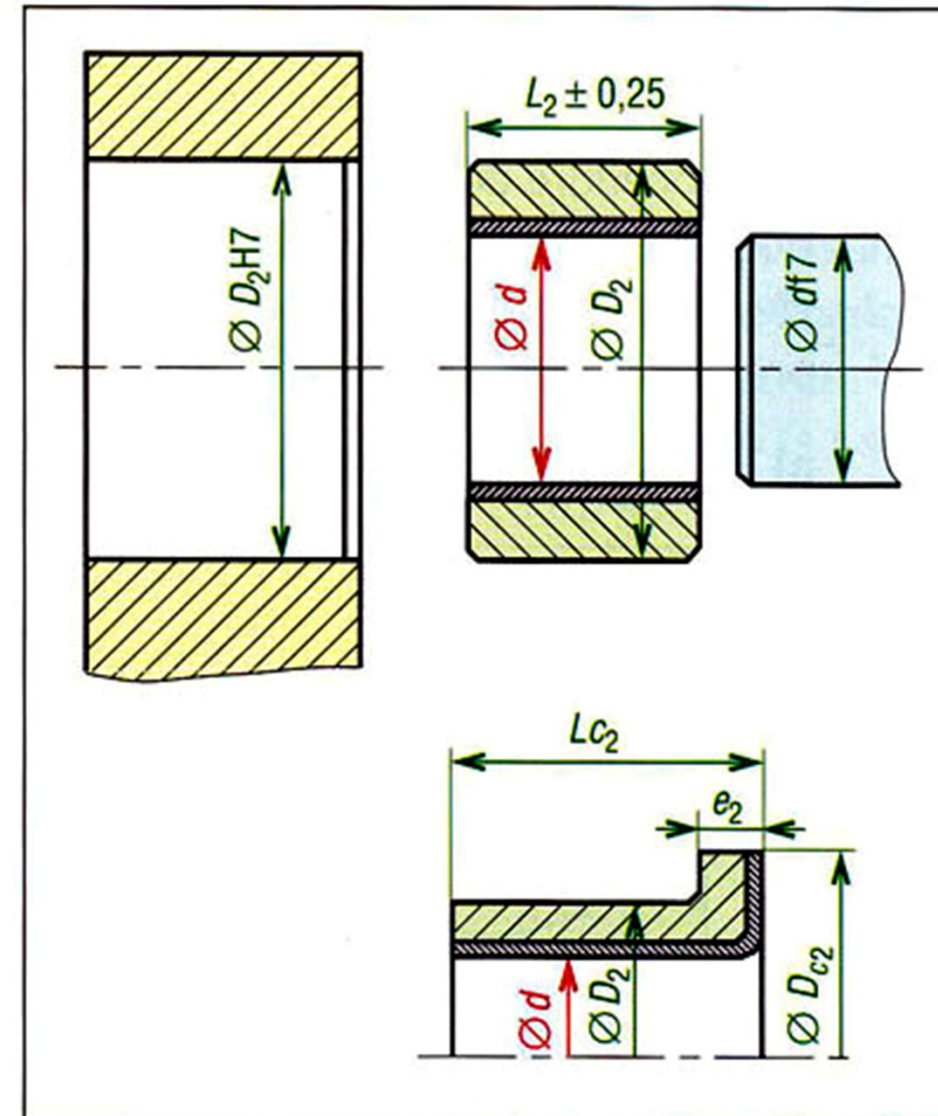
Application automobile



Dimensions normalisées



Coussinets frittés auto lubrifiants

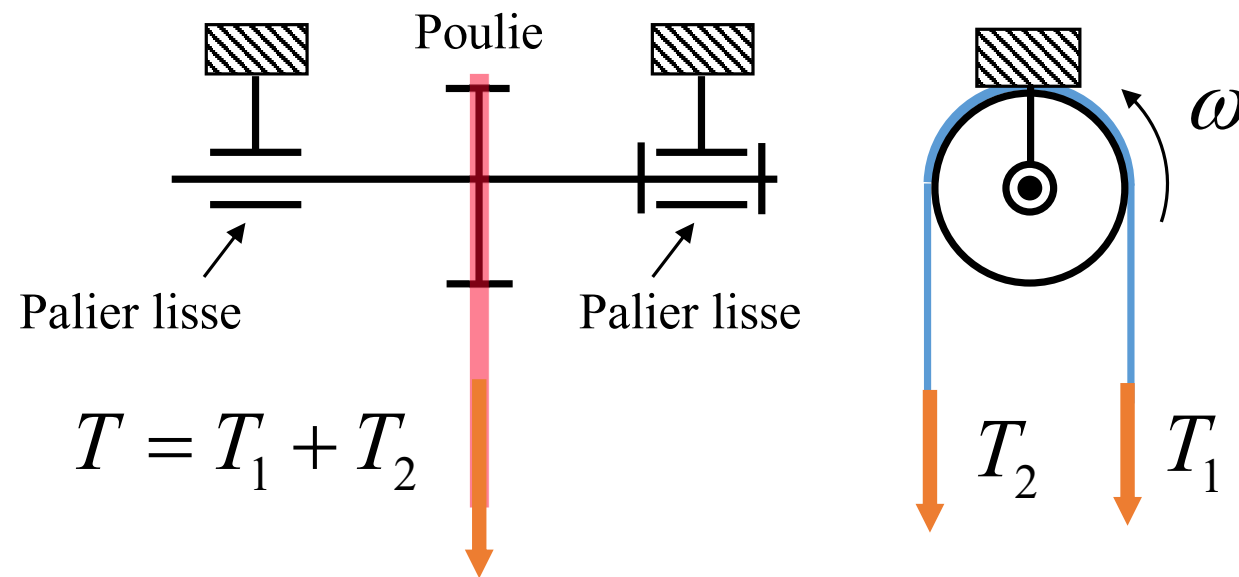


Coussinets glaciers

Dimensions normalisées

| Coussinets – extrait de dimensions normalisées (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Frittés autolubrifiants NFE 22-510 | | | | | Massifs en alliages cuivre NF ISO 4379 | | | | | Coussinets glacier (dimensions INA, SIC, SKF...) | | | | | |
| <i>d</i> | <i>D</i> ₁ | <i>D</i> _{c1} | <i>e</i> ₁ | <i>L</i> ₁ | <i>d</i> | <i>D</i> ₁ | <i>D</i> _{c1} | <i>e</i> ₁ | <i>L</i> ₁ | <i>d</i> | <i>D</i> ₂ | <i>L</i> ₂ | <i>D</i> _{c2} | <i>e</i> ₂ | <i>L</i> _{c2} |
| 3 | 6 | 9 | 1,5 | 4 | 6 | 12 | 14 | 3 | 6-10 | 3 | 4,5 | 3-5-6 | | | |
| 4 | 8 | 12 | 2 | 3-4-6 | 8 | 14 | 18 | 3 | 6-10 | 4 | 5,5 | 3-4-6-10 | | | |
| 5 | 9 | 13 | 2 | 4-5-8 | 10 | 16 | 20 | 3 | 6-10 | 5 | 7 | 5-8-10 | | | |
| 6 | 10 | 14 | 2 | 4-6-10 | 12 | 18 | 22 | 3 | 10-15-20 | 6 | 8 | 6-8-10 | 12 | 1 | 4-8 |
| 8 | 12 | 16 | 2 | 6-8-12 | 14 | 20 | 25 | 3 | 10-15-20 | 8 | 10 | 6-8-10-12 | 15 | 1 | 5,5-7,5-9,5 |
| 9 | 14 | 19 | 2,5 | 6-10-14 | 15 | 21 | 27 | 3 | 10-15-20 | 10 | 12 | 8-10-12-15-20 | 18 | 1 | 7-9-12-17 |
| 10 | 16 | 22 | 3 | 8-10-16 | 16 | 22 | 28 | 3 | 12-15-20 | 12 | 14 | 8-10-12-15-20 | 20 | 1 | 7-9-12-17 |
| 12 | 18 | 24 | 3 | 8-12-20 | 18 | 24 | 30 | 3 | 12-20-30 | 14 | 16 | 8-10-12-15-20 | 22 | 1 | 12-17 |
| 14 | 20 | 26 | 3 | 10-14-20 | 20 | 26 | 32 | 3 | 15-20-30 | 15 | 17 | 10-12-15-20-25 | 23 | 1 | 9-12-17 |
| 15 | 21 | 27 | 3 | 10-15-25 | 22 | 28 | 34 | 3 | 15-20-30 | 16 | 18 | 10-12-15-20-25 | 24 | 1 | 12-17 |
| 16 | 22 | 28 | 3 | 12-16-25 | 25 | 32 | 38 | 4 | 20-30-40 | 18 | 20 | 15-20-25 | 26 | 1 | 12-17-22 |
| 18 | 24 | 30 | 3 | 12-18-30 | 28 | 36 | 42 | 4 | 20-30-40 | 20 | 23 | 10-15-20-25-30 | 30 | 1,5 | 12-17-22 |
| 20 | 26 | 32 | 3 | 15-20-25 | 30 | 38 | 44 | 4 | 20-30-40 | 22 | 25 | 15-20-25-30 | | | 11,5-16,5-21,5 |
| 22 | 28 | 34 | 3 | 15-20-25 | 32 | 40 | 46 | 4 | 20-30-40 | 25 | 28 | 15-20-25-30-40 | 35 | 1,5 | 11,5-16,5-21,5 |
| 25 | 32 | 39 | 3,5 | 20-25-30 | 35 | 45 | 50 | 5 | 30-40-50 | 28 | 32 | 15-20-25-30 | | | |
| 28 | 36 | 44 | 4 | 20-25-30 | 38 | 48 | 54 | 5 | 30-40-50 | 30 | 34 | 15-20-25-30-40 | 42 | 2 | 16-26 |
| 30 | 38 | 46 | 4 | 20-25-30 | 40 | 50 | 58 | 5 | 30-40-60 | 35 | 39 | 20-30-35-40-50 | 47 | 2 | 16-26 |
| 32 | 40 | 48 | 4 | 20-25-30 | 42 | 52 | 60 | 5 | 30-40-60 | 40 | 44 | 20-30-40-50 | 52 | 2 | 16-26 |
| 35 | 45 | 55 | 5 | 25-35-40 | 45 | 55 | 63 | 5 | 30-40-60 | 45 | 50 | 20-30-40-45-50 | | | |
| 38 | 48 | 58 | 5 | 25-35-45 | 48 | 58 | 66 | 5 | 40-50-60 | 50 | 55 | 20-30-40-50-60 | | | |
| 40 | 50 | 60 | 5 | 30-40-50 | 50 | 60 | 68 | 5 | 40-50-60 | 55 | 60 | 20-25-30-40-50 | | | |
| 45 | 55 | 65 | 5 | 35-45-55 | 55 | 65 | 73 | 5 | 40-50-70 | 60 | 65 | 20-30-40-60-70 | | | |
| 50 | 60 | 70 | 5 | 35-50 | 60 | 75 | 83 | 7,5 | 40-60-60 | 65 | 70 | 30-50-70 | | | |
| 55 | 65 | 75 | 5 | 40-55 | 65 | 80 | 88 | 7,5 | 50-60-80 | 70 | 75 | 40-50-70 | | | |
| 60 | 72 | 84 | 6 | 50-60-70 | 70 | 85 | 95 | 7,5 | 50-70-90 | 75 | 80 | 60-80 | | | |
| | | | | | 75 | 90 | 100 | 7,5 | 50-70-90 | 80 | 85 | 60-100 | | | |
| | | | | | 80 | 95 | 105 | 7,5 | 60-80-100 | 85 | 90 | 30-60-100 | | | |
| Tolérance : <i>D</i> logement : H7 ; après emmanchement, <i>D</i> bague : H7 ou H8 si <i>D</i> ≥ 50 ; <i>D</i> _c , <i>a</i> c et <i>L</i> : js13 ; concentricité <i>d</i> / <i>D</i> IT9 ; chanfreins à 45° | | | | | Tolérance : <i>D</i> logement H7 ; <i>D</i> bague : s6 et <i>d</i> : E6 (H8 après emmanchement) ; <i>D</i> _c : d11 ; <i>L</i> : h13 ; concentricité <i>d</i> / <i>D</i> : IT8 ; chanfreins à 45° ; <i>R</i> _a , <i>d</i> et <i>D</i> : 1,6 μm | | | | | Tolérance : <i>D</i> logement H7 ; longueur <i>L</i> ± 0,25 ; <i>d</i> arbre : f7 avec <i>R</i> _a ≤ 0,4 μm | | | | | |

Application: Dimensionnement d'un palier lisse

Données:

Palier lisse glacier: INA permaglides, PTFE+Pb+bronze
 Diamètre intérieur $d=40\text{mm}$, Largeur $L=40\text{mm}$
 Diamètre de la poulie: $D_p=200\text{mm}$

Enoncé:

Une poulie est entraînée par une courroie transmettant les tensions T_1 et T_2 dans ses deux brins. La poulie est montée sur un arbre tournant à une vitesse $\omega=800\text{ tr/min}$ dans deux paliers lisses de type coussinet glacier sec.

1. Déterminer la charge maximum $T = T_1 + T_2$ qui peut être appliquée à la courroie en tenant compte de toutes les conditions de fonctionnement: p_{\max} , $(pv)_{\max}$, v_{\max}
2. Quelle est la condition la plus restrictive? On ne considère pas la flexion de l'arbre.

| Vitesse maximale admissible | Produit pv maxi $\text{N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$ | Exemple |
|-----------------------------|---|---|
| 2 à 3 m/s | $p_{v_{\text{continu}}} : 1,8$ $p_{v_{\text{temporaire}}} : 3,6$ ($p < 140 \text{ N/mm}^2$) | INA : permaglides P1 SIC : DU SKF : glycodur F... |

Application: Dimensionnement d'un palier lisse

Solution:

1. 1. Pression dynamique maximale sur un palier:
 $p_{max} = 140 \text{ N/mm}^2 = \frac{T/2}{dL}$ car 2 paliers se repartissent T

On calcule T pour p_{max} :

$$T = 2 \times 140 \times 40 \times 40 = 448 \text{ kN}$$

2. Vitesse circonférentielle maximale: $v_{max} = 3 \text{ m/s}$

On calcule v réelle pour $v = 800 \text{ tr/min}$:

$$v = \omega \cdot \frac{d}{2} = 800 \times \frac{2\pi}{60} \times 20 \times 10^{-3} = 1.6 \text{ m/s}$$

On a donc: $v < v_{max}$

3. Produit pv maximum: $(pv)_{max} = 1.8 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$

On calcule $p_{max} \cdot v$:

$$p_{max} \cdot v = 140 \times 1.6 = 224 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s} > (pv)_{max} = 1.8 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$$

On calcule p admissible pour v réelle:

$$p_{adm} = (pv)_{max} / v = 1.8 / 1.6 = 1.125 \text{ N/mm}^2 \text{ d'où T pour } p_{adm} :$$

$$T_{adm} = 2 \times 1.125 \times 40 \times 40 = 3.6 \text{ kN}$$

2. La condition la plus restrictive est celle du produit $(pv)_{max}$.

| Vitesse maximale admissible | Produit pv maxi $\text{N/mm}^2 \cdot \text{m/s}$ | Exemple |
|-----------------------------|---|--|
| 2 à 3 m/s | $p_{v_{\text{continu}}} : 1,8$ $p_{v_{\text{temporaire}}} : 3,6$ ($p < 140 \text{ N/mm}^2$) | INA : permaglide P1 SIC : DU SKF : glycodur F... |

Données:

Palier lisse glacier: INA permaglide,
PTFE+Pb+bronze

Diamètre intérieur $d=40 \text{ mm}$, Largeur
 $L=40 \text{ mm}$

Diamètre de la poulie: $D_p=200 \text{ mm}$

Application: Dimensionnement d'un palier lisse

| Vitesse maximale admissible | Produit pv maxi N/mm ² · m/s | Exemple |
|-----------------------------|---|--|
| 2 à 3 m/s | pv _{continu} : 1,8 pv _{temporaire} : 3,6 (p < 140 N/mm ²) | INA : permaglide P1 SIC : DU SKF : glycodur F... |

Données

Palier lisse glacier: INA permaglide, PTFE+Pb+bronze.

Diamètre intérieur $d = 40$ mm, largeur $L = 40$ mmDiamètre de la poulie $D_p = 200$ mm

$$1) \text{ Pression diamétrale dynamique maximale } 140 \text{ N/mm}^2 = \frac{T/2}{dL}$$

$$\rightarrow T_{\text{pression}} = 2 \times 140 \times 40 \times 40 = 4,48 \times 10^5 \text{ N}$$

$$2) V_{\text{max}} = 3 \text{ m/s} ; (pV)_{\text{max}} = 1,8 \text{ N/mm}^2 \times \text{m/s} ;$$

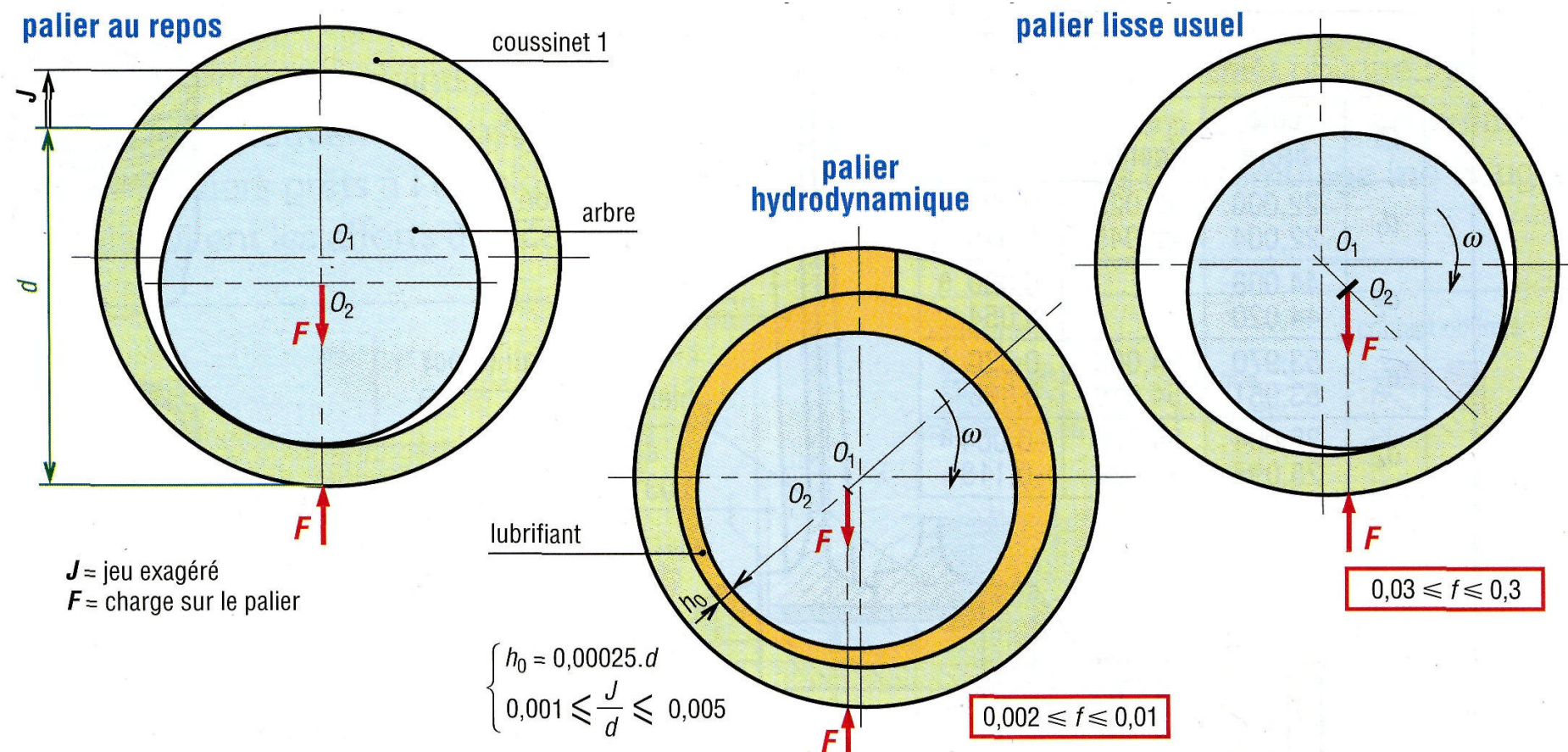
$$V = \frac{\omega \times 2\pi}{60} d / 2 = \frac{800 \times 2 \times \pi}{60} \times 20 \times 10^{-3} = 1,6 \text{ m/s} < V_{\text{max}}$$

$$3) pV = 140 \times 1,6 = 224 \text{ N/mm}^2 \times \text{m/s} \square (pV)_{\text{max}} = 1,8 \text{ N/mm}^2 \times \text{m/s}$$

$$\rightarrow p_{\text{adm}} = \frac{1,8}{1,6} = 1,125 \text{ N/mm}^2 \rightarrow T_{\text{adm}} = 2 \times 40 \times 40 \times 1,125 = 3600 \text{ N}$$

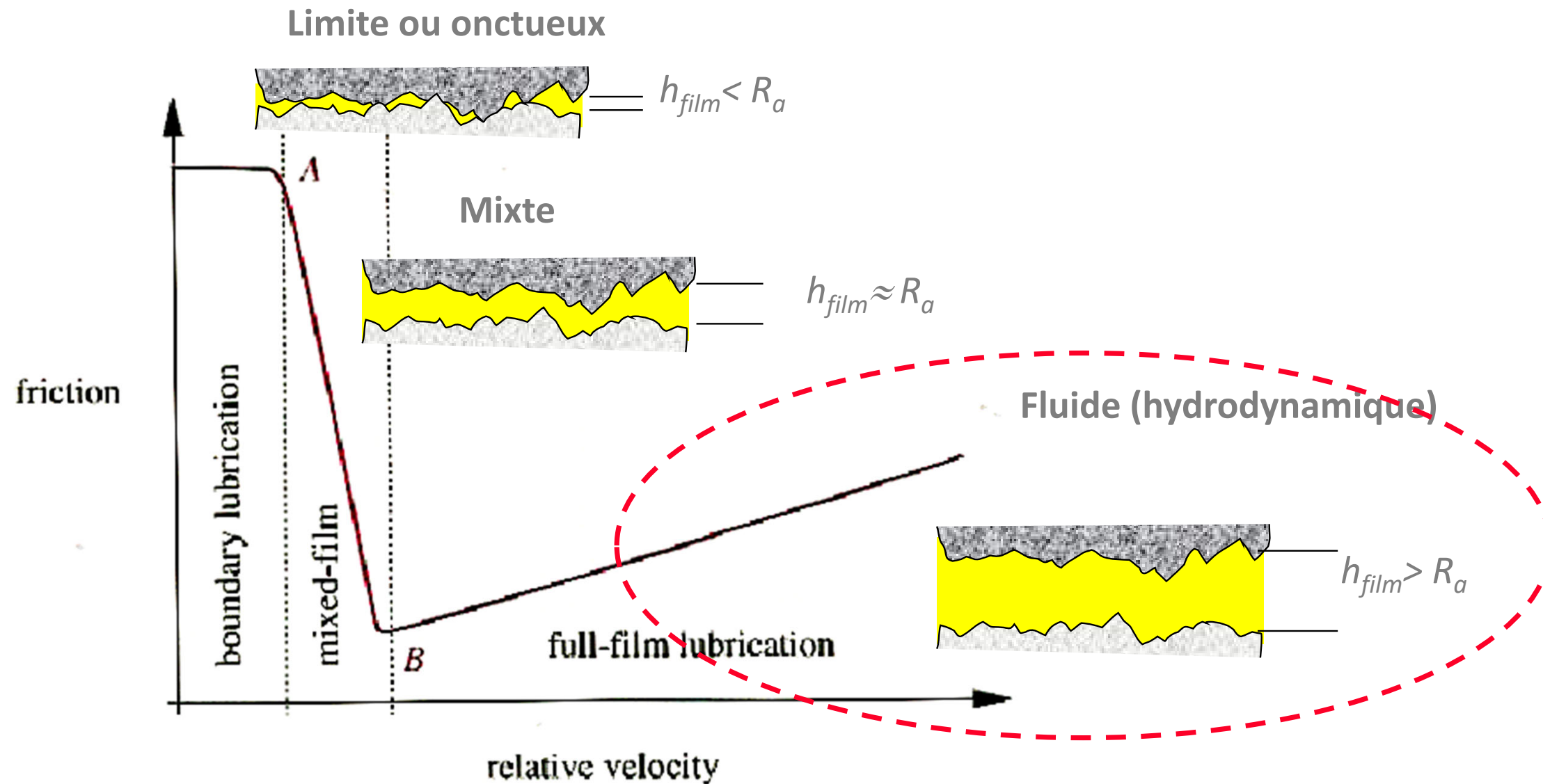
La condition la plus restrictive est celle du produit $(pV)_{\text{max}}$

Palier lisse classique et hydrodynamique

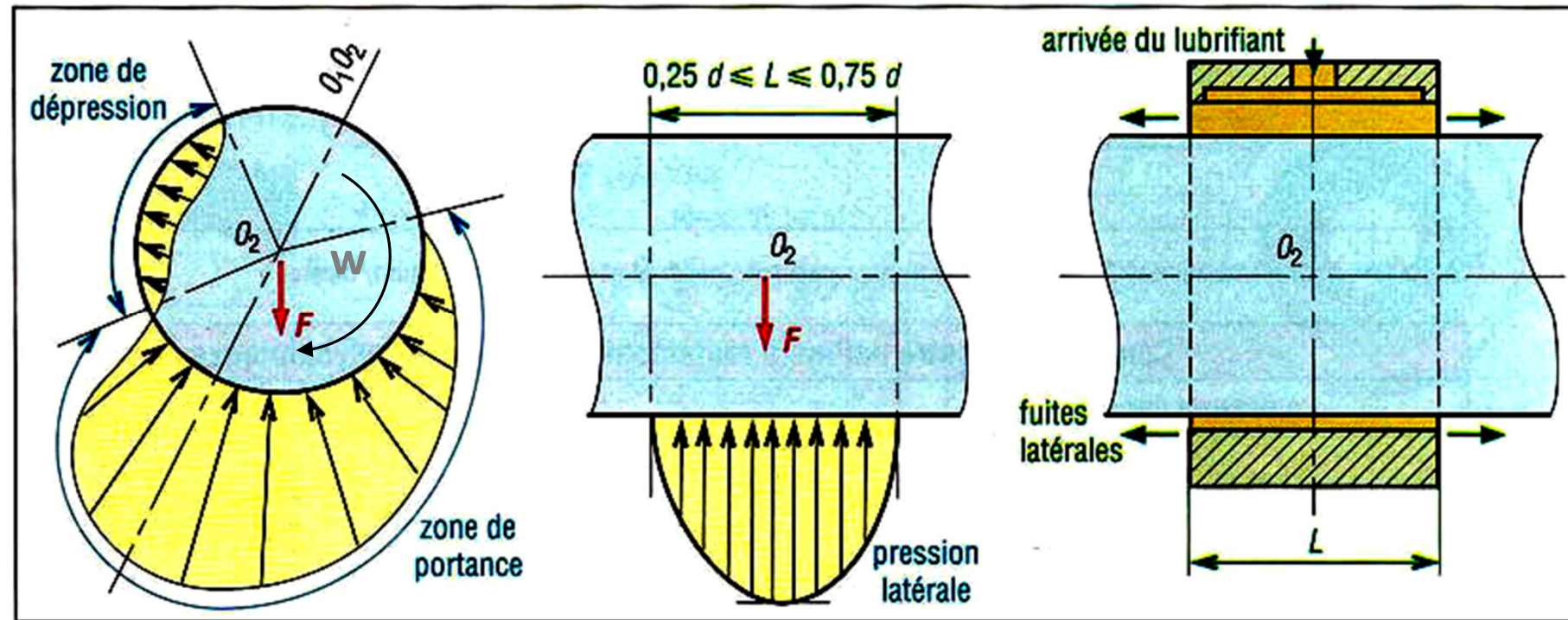


- Film fluide entre arbre et coussinet; alimentation en huile

Palier lisse hydrodynamique – Régime de Lubrification



Palier lisse hydrodynamique – Principe de Fonctionnement



- Distribution de pression générée par l'écoulement visqueux de fluide entre l'arbre et le coussinet. La portance dépend de la vitesse, de la viscosité du fluide et du jeu diamétral.

Comparaison paliers hydrostatiques et paliers à corps roulants

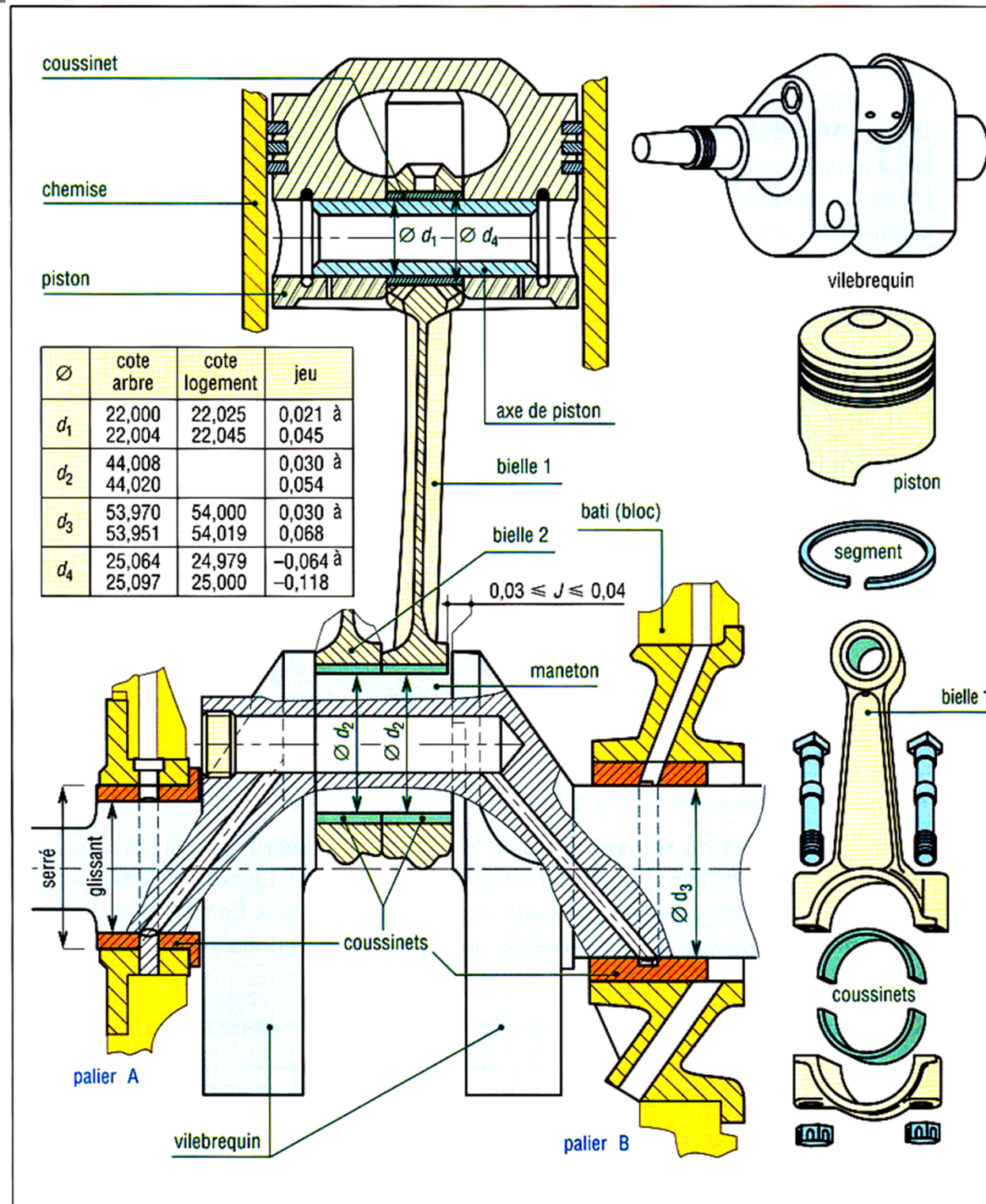
| Comparaison entre paliers à roulement et paliers hydrodynamiques | |
|---|--|
| avantages des roulements | avantages du palier hydrodynamique |
| <ul style="list-style-type: none">– préférable si le couple de démarrage est élevé– lubrification plus facile à réaliser– moins encombrants axialement– peuvent supporter des charges combinées– facilement interchangeables (normes ISO)– une avarie est signalée par un bruit croissant du palier– permettent un centrage précis des arbres– supportent mieux les surcharges momentanées | <ul style="list-style-type: none">– moins encombrant radialement– coût initial moins élevé– moins sensible aux poussières et aux corps étrangers– une durée de vie non limitée par le phénomène de fatigue– supportent mieux les chocs et les vibrations- amortissement |

Remarque sur les paliers:

- On peut aussi réaliser des paliers lisses axiaux et des paliers hydrodynamiques axiaux. On parle alors de:

butée

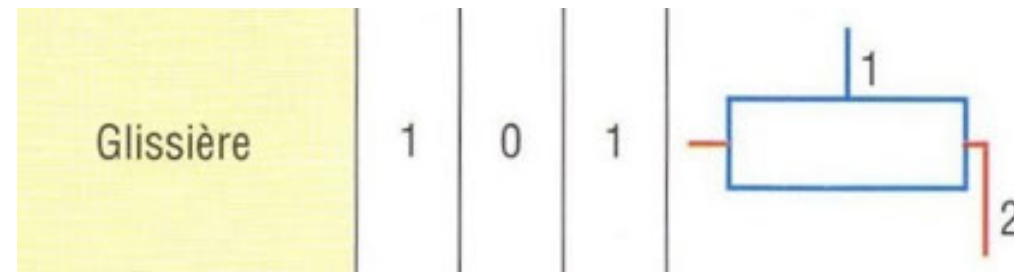
Application pratique: moteur à explosion



Liaison glissière

Torseur Cinématique

$$\begin{Bmatrix} 0 & v_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

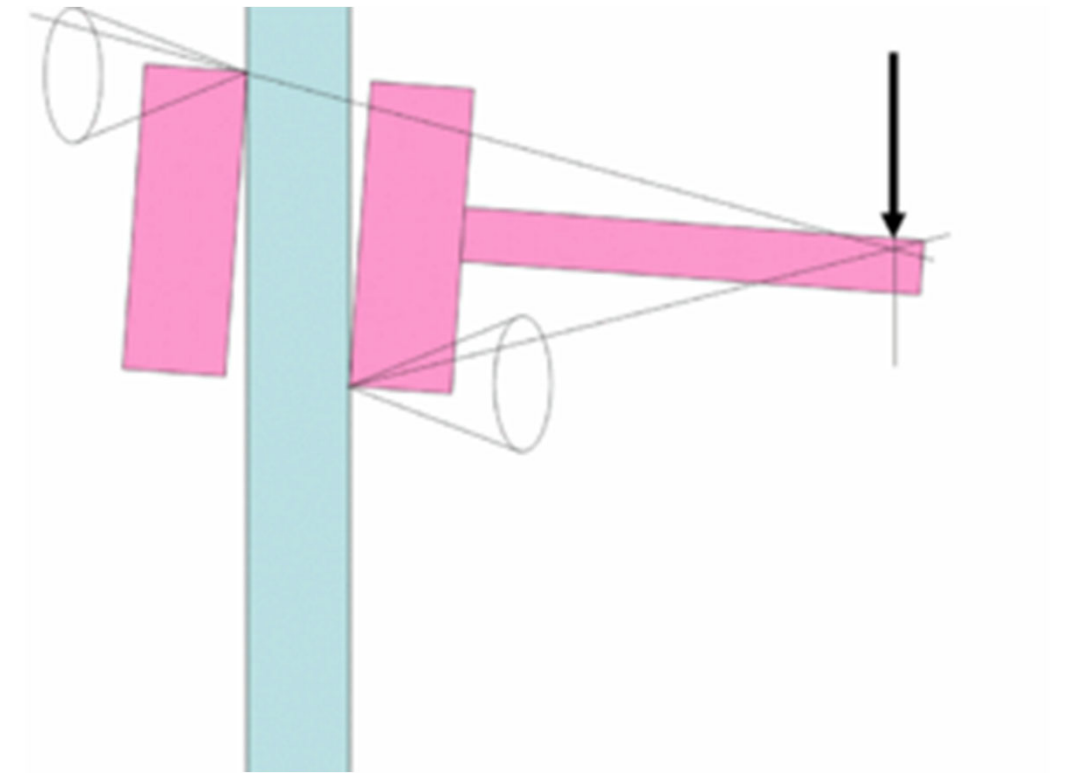
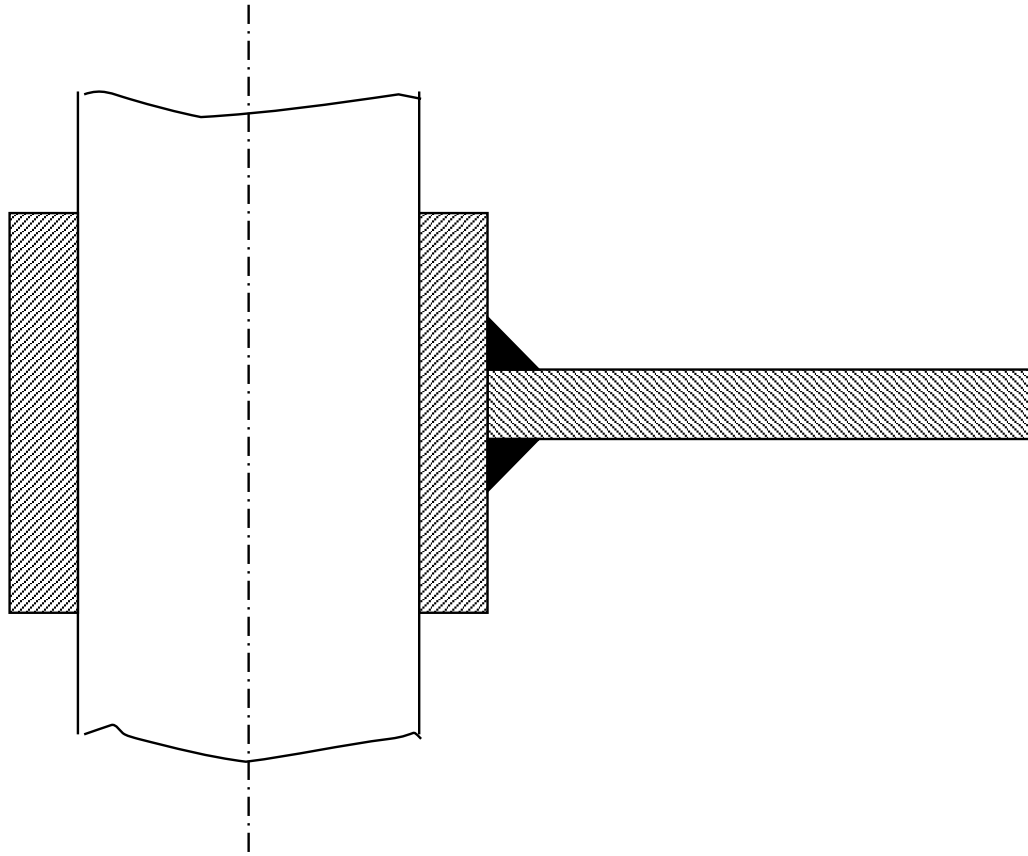


Torseur Actions Mécaniques

$$\begin{Bmatrix} 0 & M_x \\ F_y & M_y \\ F_z & M_z \end{Bmatrix}$$

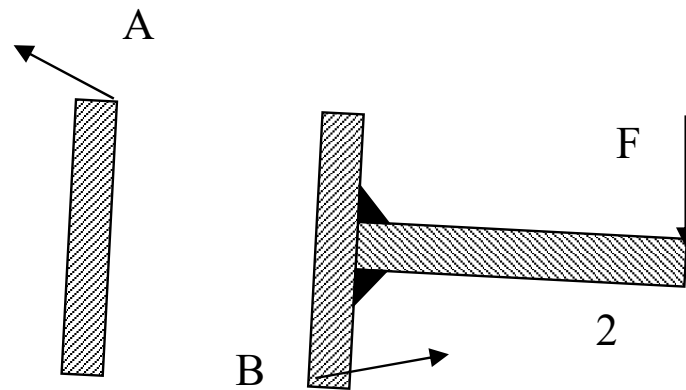
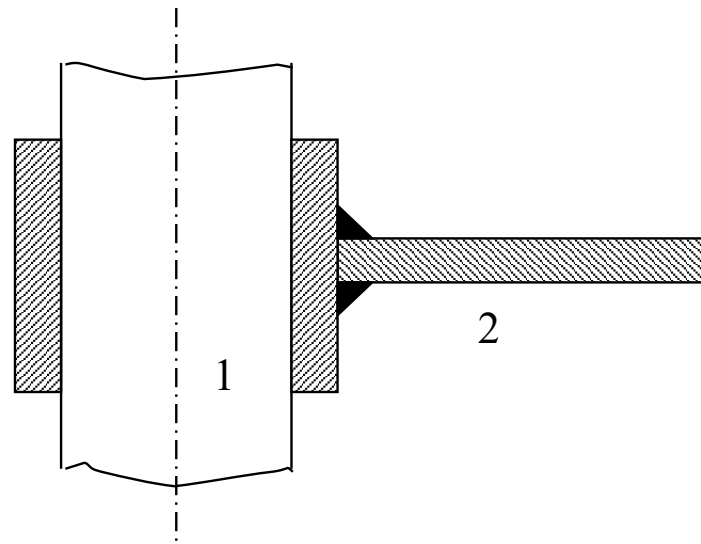
Glissière lisse
Guide à roulement

Arc-boutement ou Glissement ?

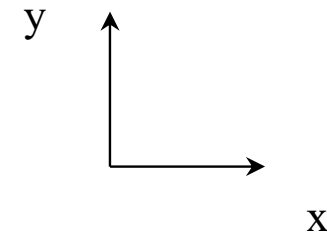
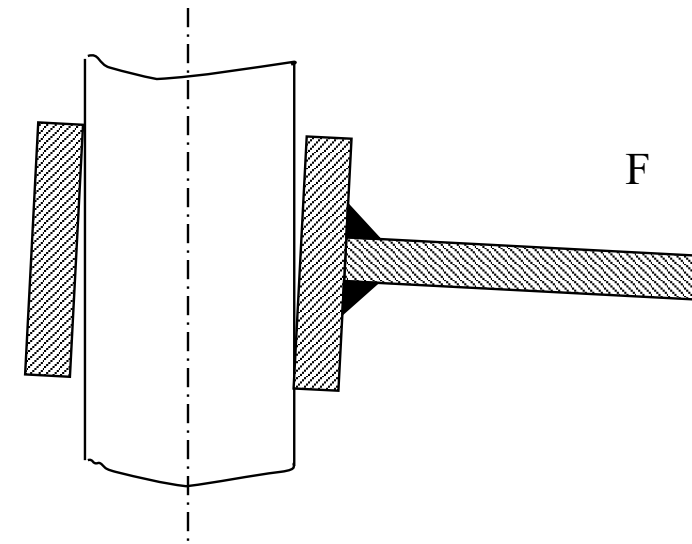


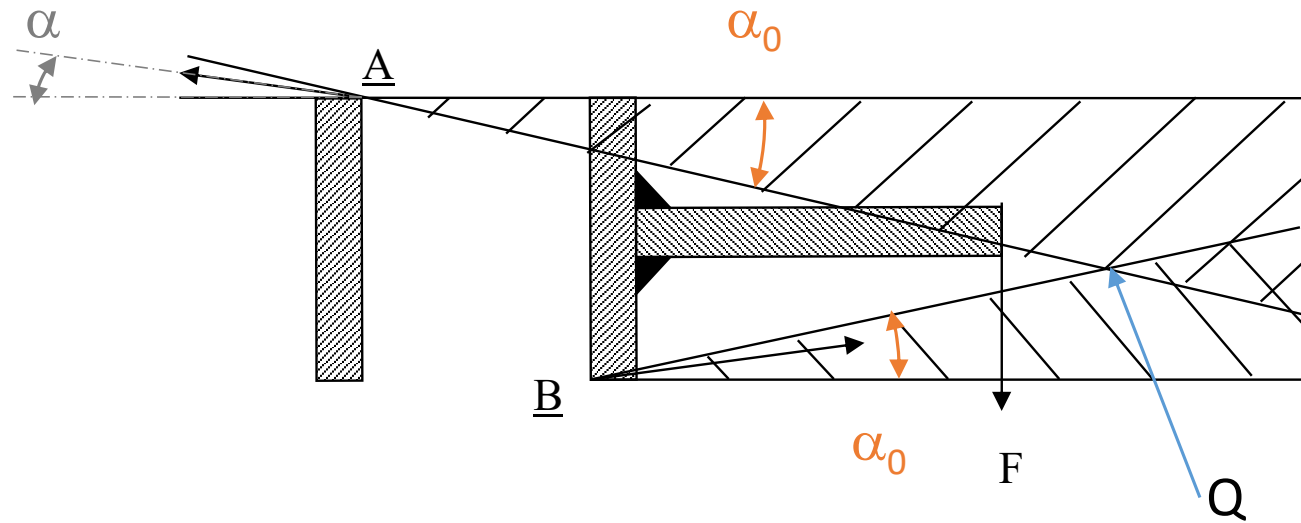
Equilibre ou mouvement ?

Etude: Cas parfait



Cas réel





$$\{A\}_M + \{B\}_M + \{F\}_M = 0$$

Arc-boutement $\alpha < \alpha_0$

Limite du mouvement $\alpha = \alpha_0$

Mouvement $\alpha = \alpha_0$

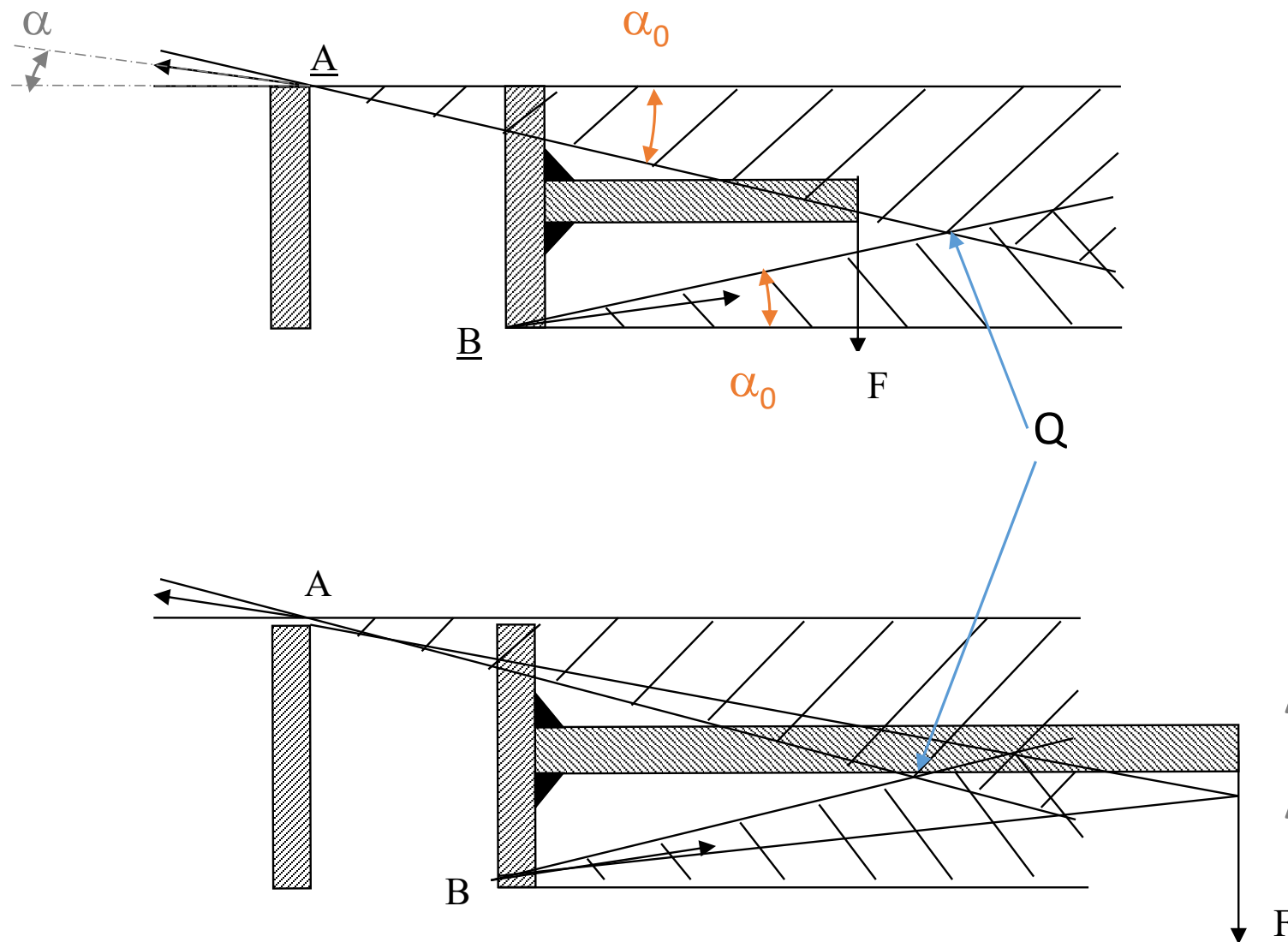
α_0 = angle d'adhérence

$$\{A\}_M + \{B\}_M + \{F\}_M = 0$$

Equilibre si les 3 forces sont concourantes:

En deçà - Impossible:
mouvement

Au delà - Possible:
Arc-boutement, équilibre



$$\{A\}_M + \{B\}_M + \{F\}_M = 0$$

$$\frac{h}{2\mu_0} = l$$

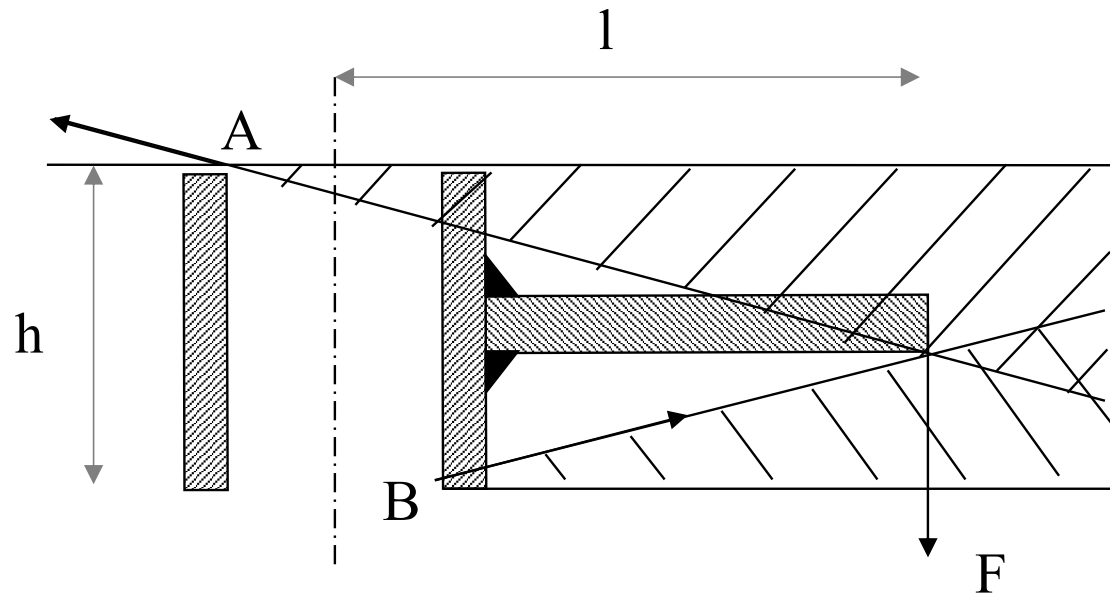
Limite d'équilibre

$$\frac{h}{2\mu_0} < l$$

Arc-boutement (pas de mouvement)

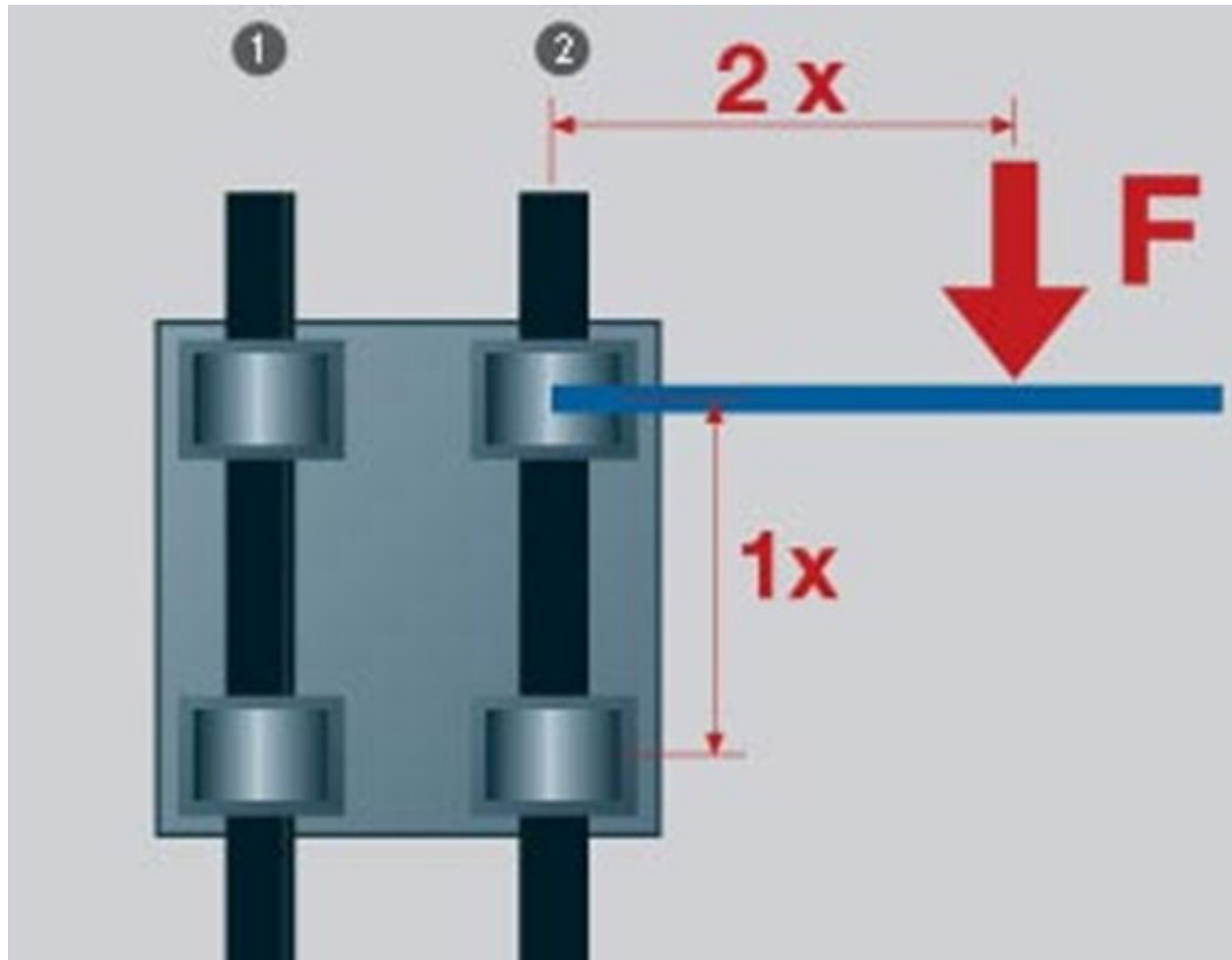
$$\frac{h}{2\mu_0} > l$$

Mouvement

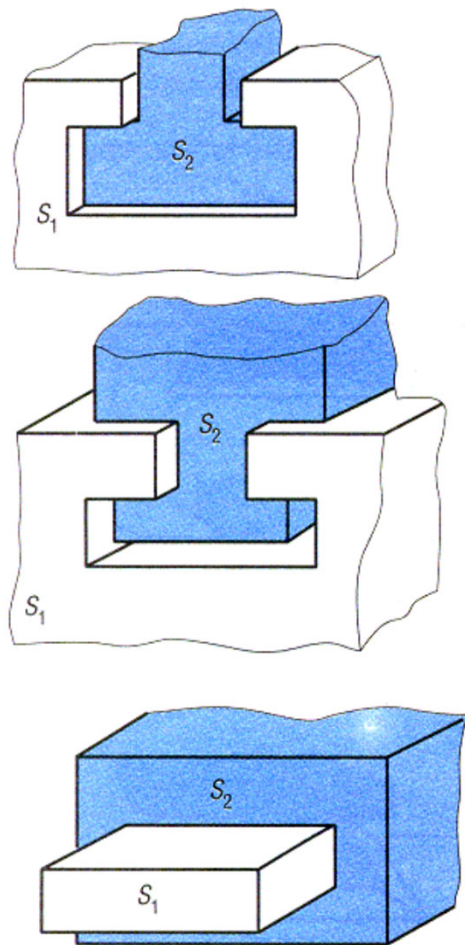
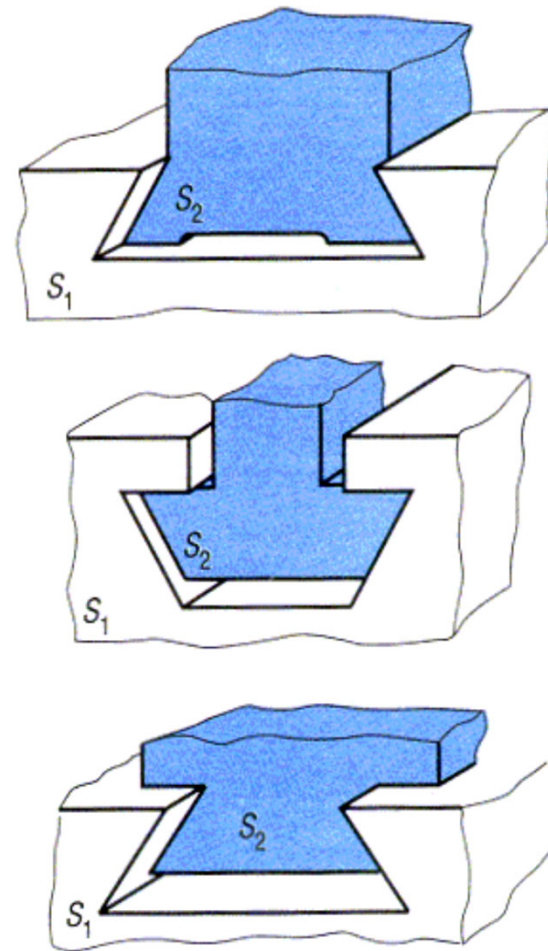


Pour faciliter le mouvement: augmenter h et diminuer l

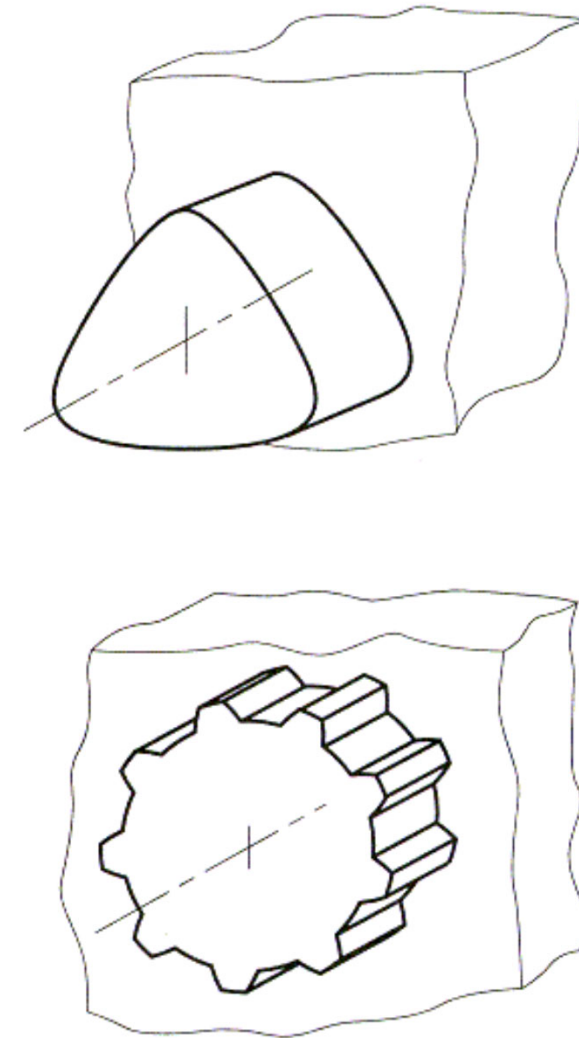
En pratique: diminuer frottement (matériaux, lubrification, roulement)



Glissières a Frottement

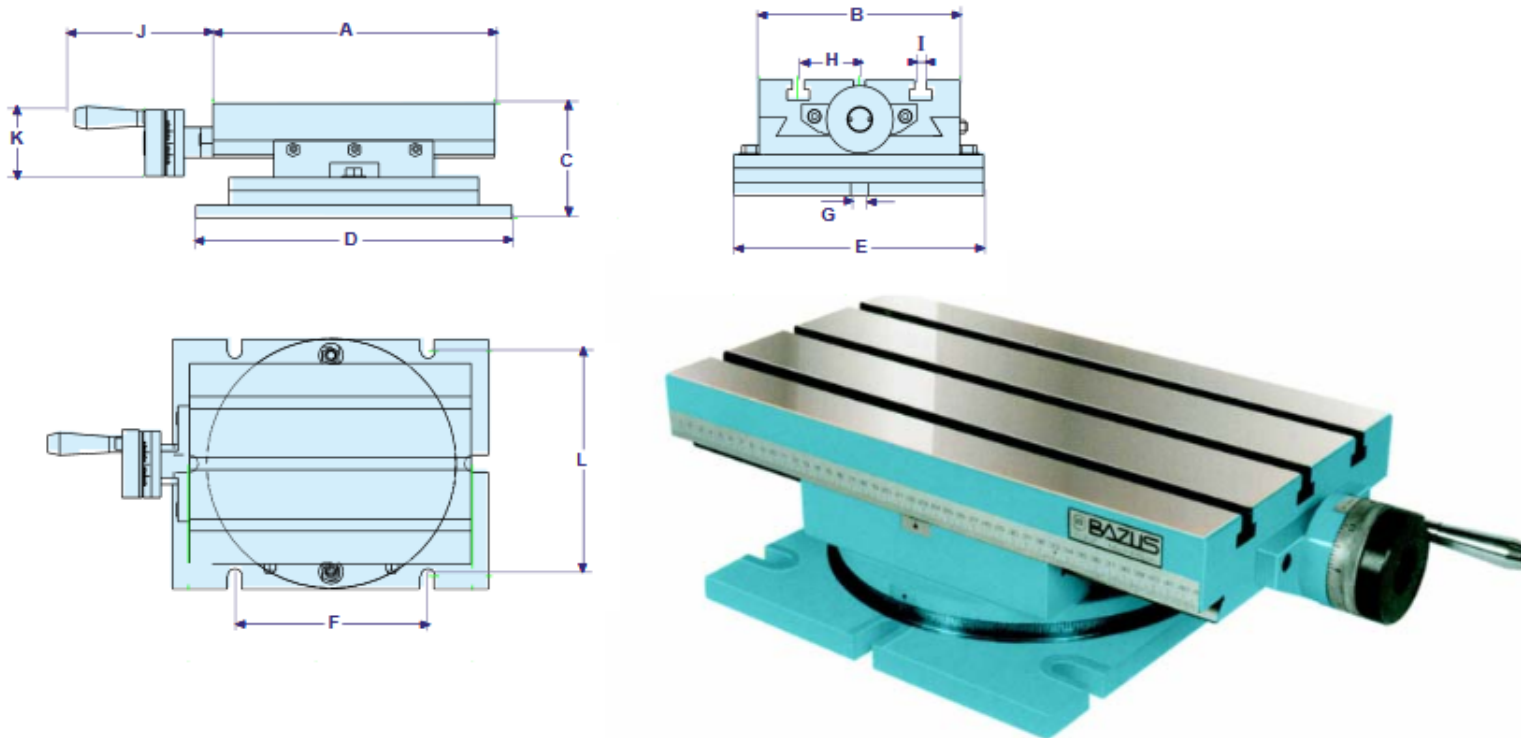
Glissière prismatique
en TGlissière prismatique
en queue d'aronde

Profil « polygon »



Cannelures

Exemples de Glissières a Frottement



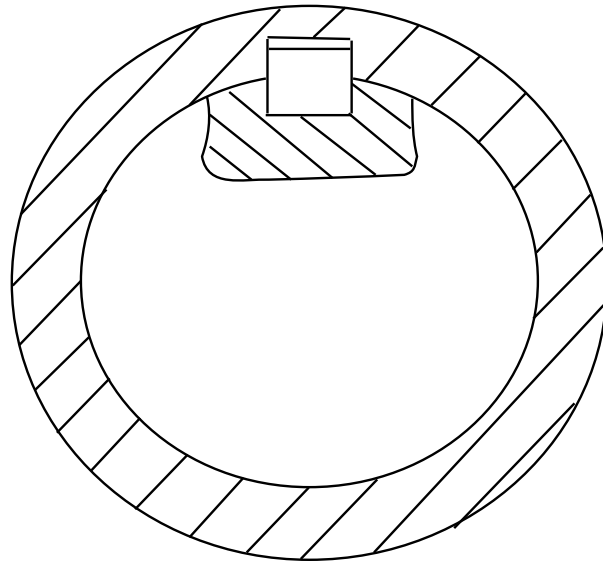
Machine outil

<http://www.gbmo.eu/machine-outil/notice-table-bazus-a-mouvements-croises-et-base-tournante-serie-tp.pdf>

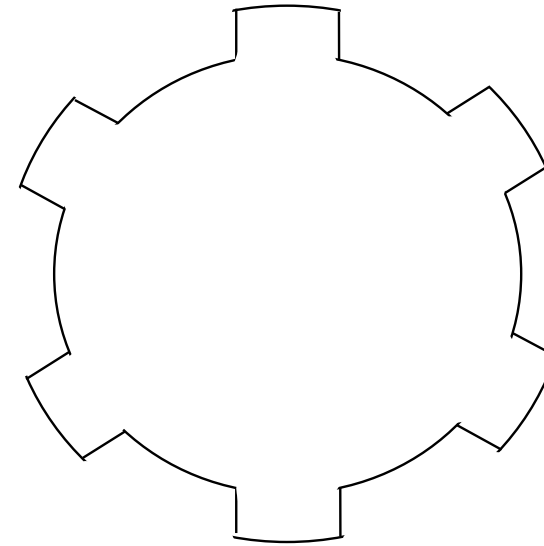


Ameublement

Exemples de Glissières a Frottement

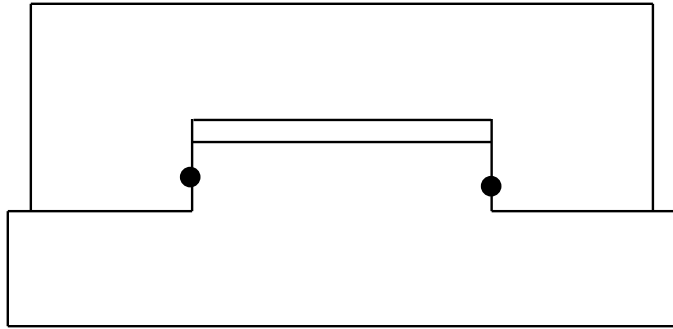


Clavetage

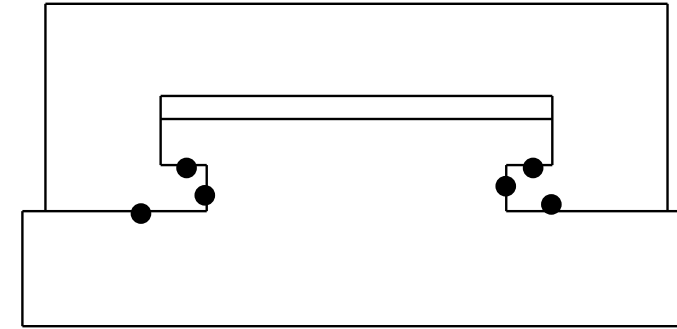


Cannelures

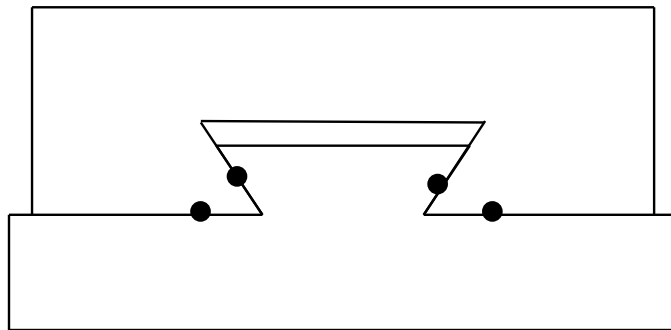
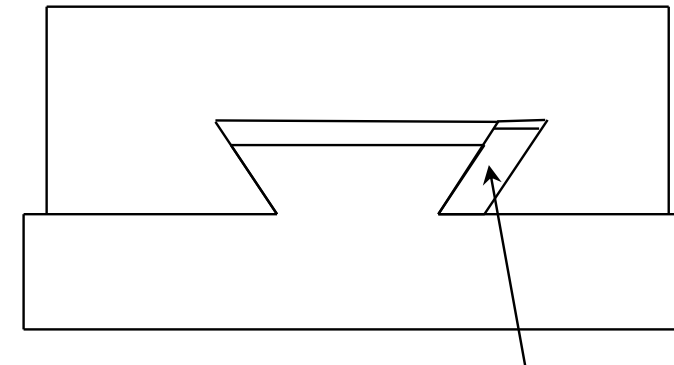
Exemples de Glissières a Frottement



Glissière en Té

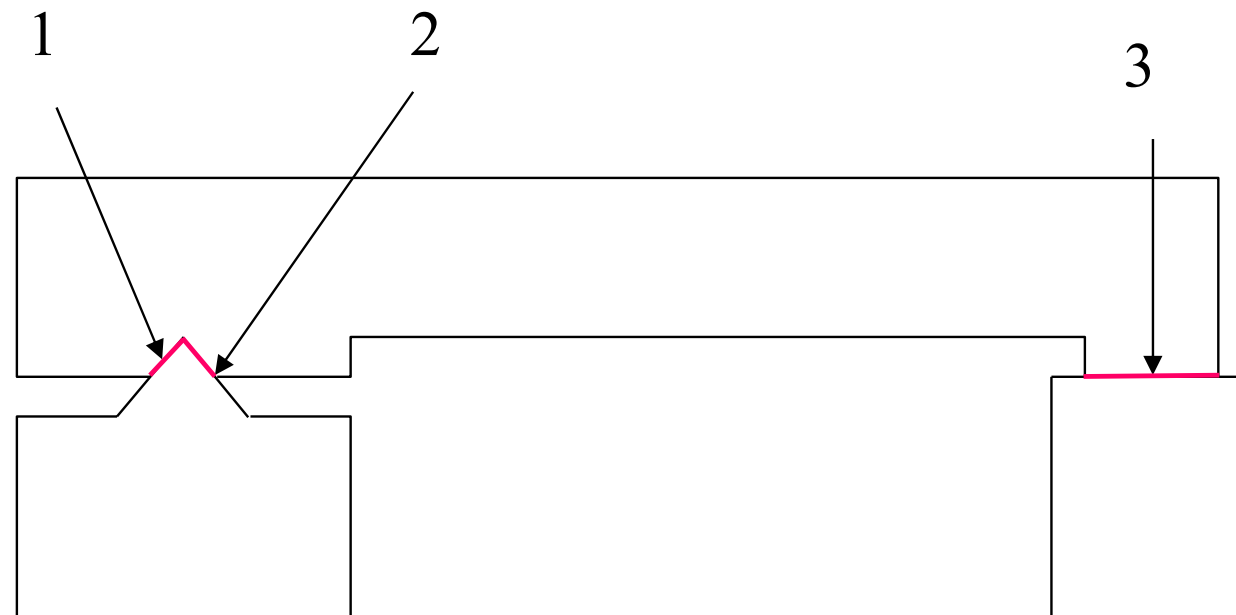


- Jeu fonctionnel nécessaire

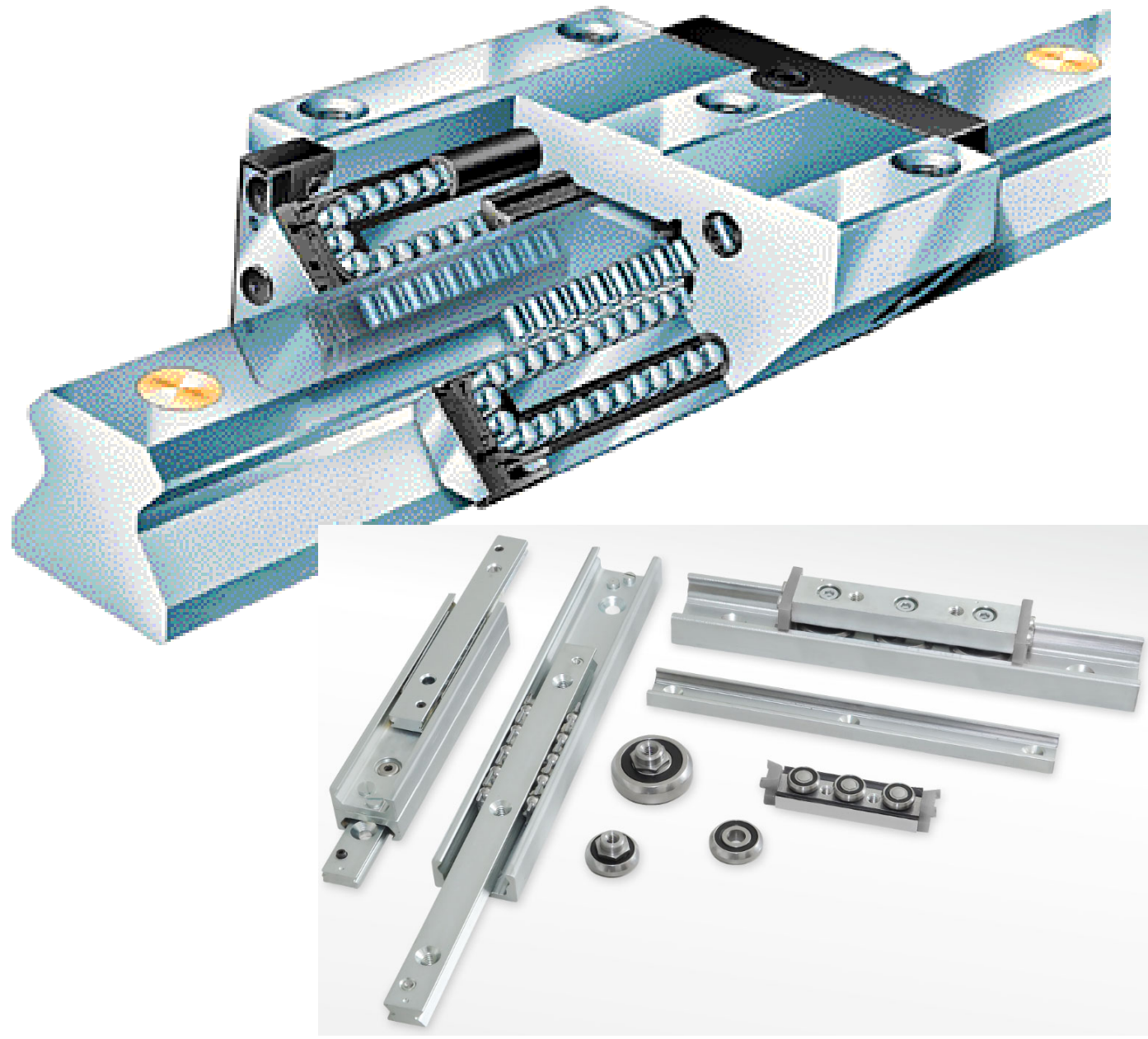
Glissière à queue
d'aronde

Cale de
rattrapage
de jeu

Exemples de Glissières à Frottement



Banc de tour et chariot longitudinal



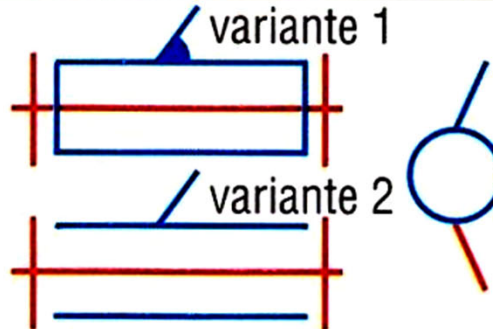
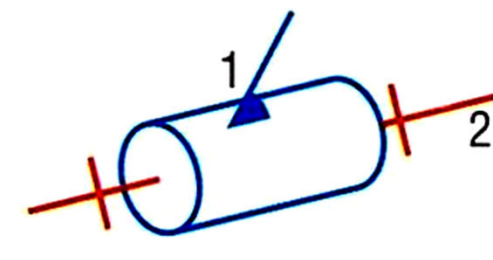
Fonctions

- Retirer des degrés de liberté à un arbre ou un axe
 - Le nombre de DDL et leur nature dépendent du type de roulement et du montage
- Réduire le frottement

Principes physiques

- Transmission d'effort par obstacle
- 3^{ème} corps entre surface: roulement sans glissement

Liaison normalisée: pivot

| | | | | | |
|-------|---|---|---|---|---|
| Pivot | 0 | 1 | 1 |  |  |
|-------|---|---|---|---|---|

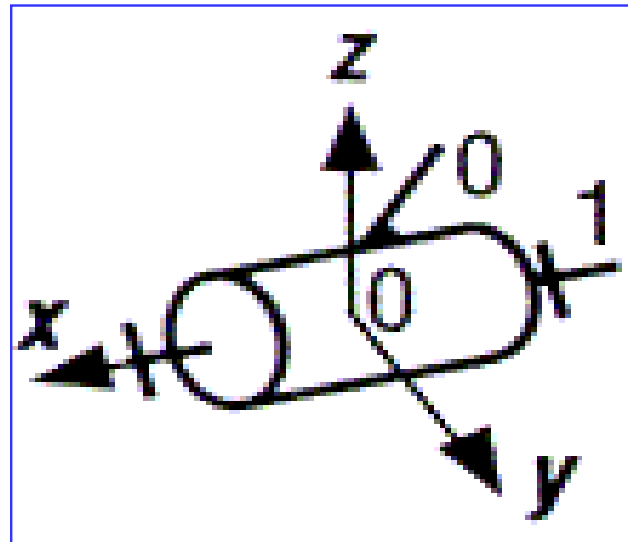
Translation

Rotation

DDL

Torseur cinématique

- Pas de frottement
- Pas de jeu
- Géométrie parfaite

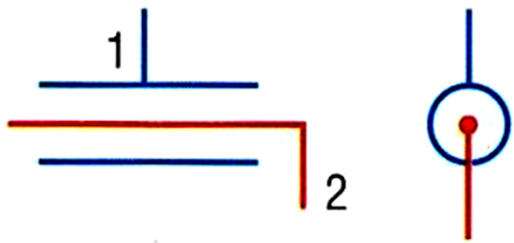
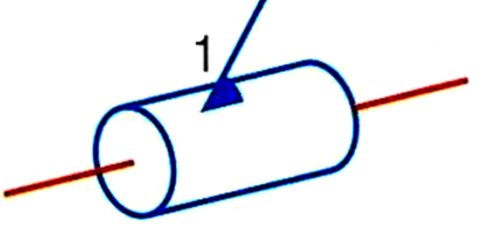


$$V_{1/0} = \begin{Bmatrix} \Omega_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_o$$

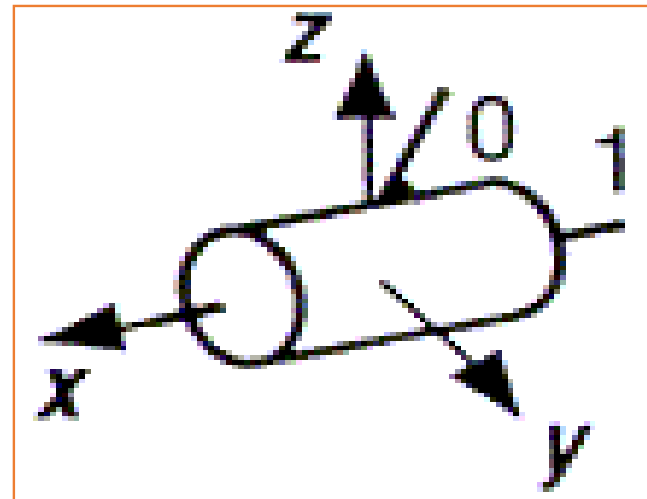
Rotation

Translation

Liaison normalisée: pivot glissant

| | | | | | |
|----------------|-------------|----------|-----|---|---|
| Pivot glissant | 1 | 1 | 2 |  |  |
| | Translation | Rotation | DDL | Torseur cinématique | |

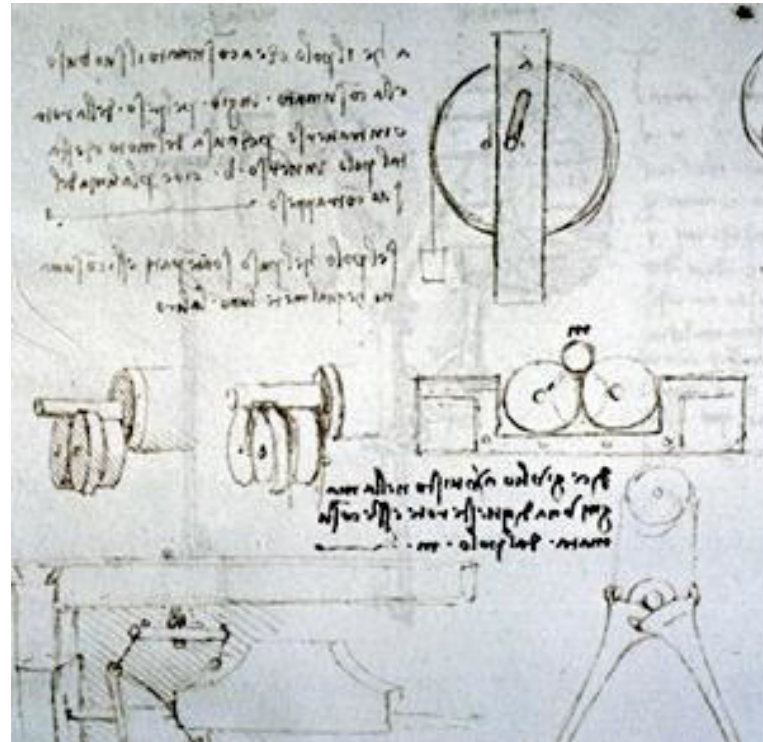
- Pas de frottement
- Pas de jeu
- Géométrie parfaite



$$V_{1/0} = \left\{ \begin{array}{cc} \Omega_x & V_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_O$$

Rotation Translation

Un peu d'histoire . . .



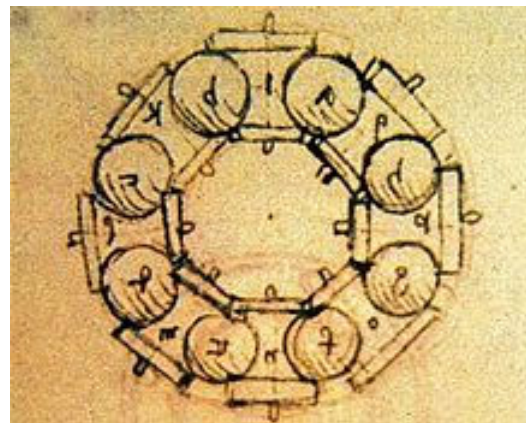
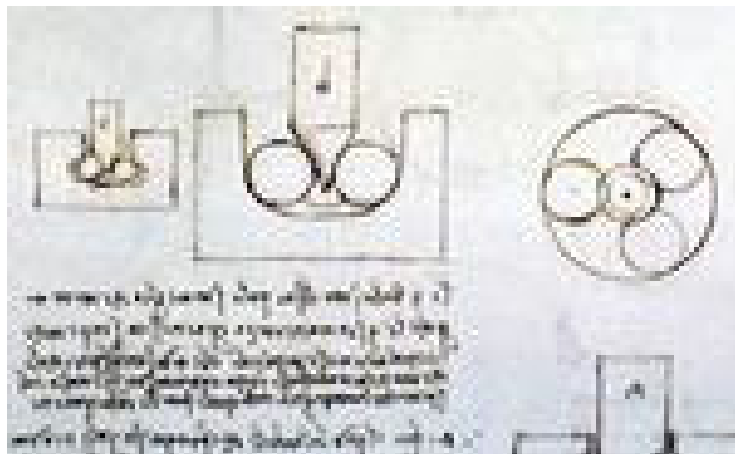
Depuis les Egyptiens en Antiquité
Rome en 40BC

Leonardo da Vinci
1452-1519

Galileo
1564-1642

1^{er} brevet: Philip Vaughn en 1794

Révolution Industrielle XIXe siècle



Principaux fabricants et inventeurs depuis la fin du XIXe:

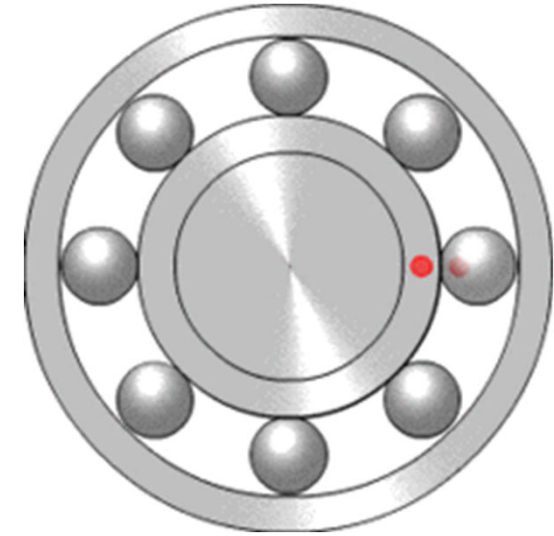
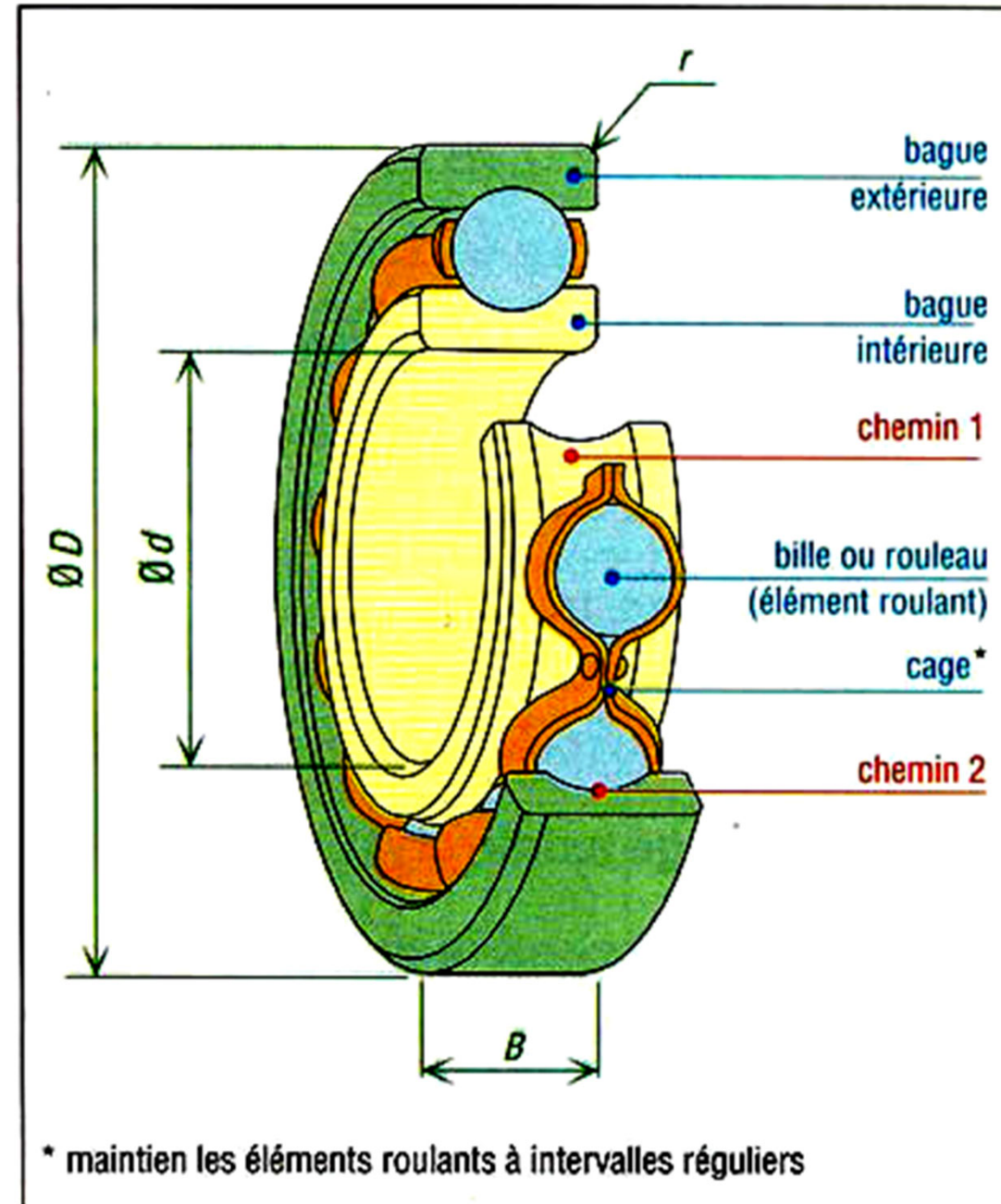


TIMKEN

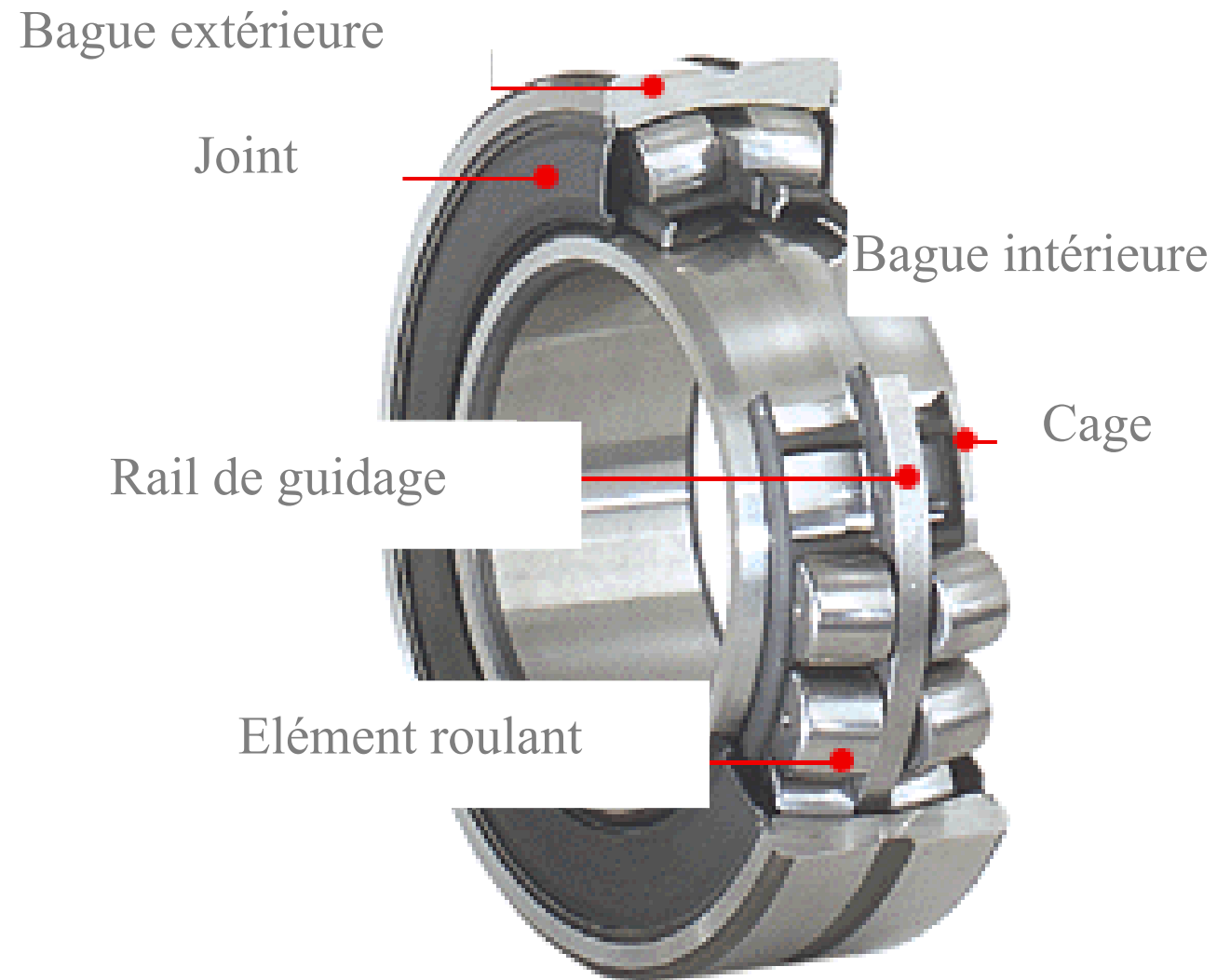
SKF

Constitution des roulements

- Différentiation:
 - Géométrie des corps roulants
 - Géométrie de la bague: direction de la normale au plan tangent bague – corps roulants
 - Éléments additionnels
 - Flasques
 - Joints
 - Tolérances et jeux
 - Lubrification



Constitution des roulements



Constitution des roulements

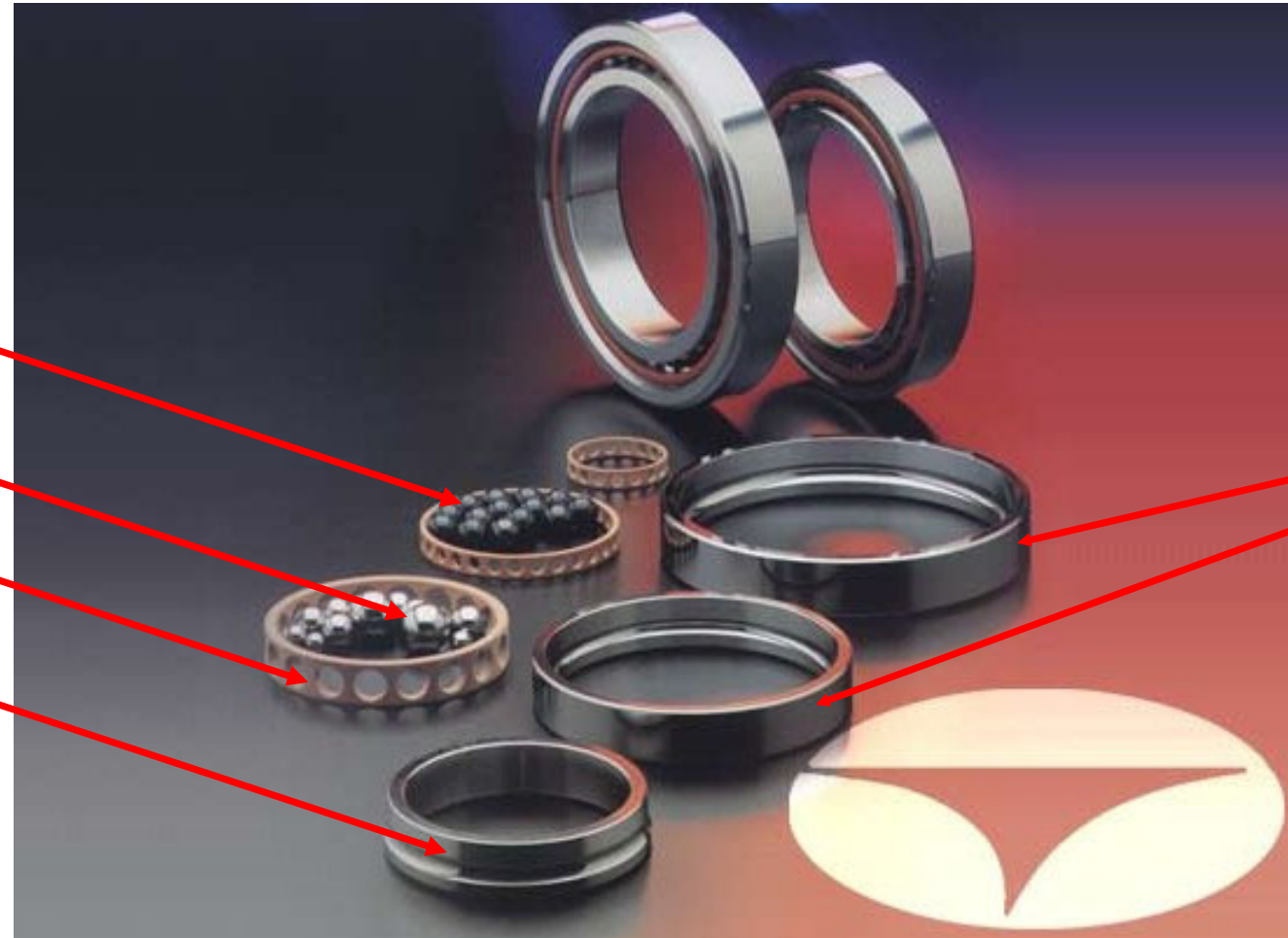
Billes en Si_3N_4

Billes en acier

Cage

Bague
intérieure

Bagues
extérieures



<http://www.snfa.com/index.php?id=7>

Matériaux Utilisés

CORPS ROULANTS

- Aciers d'amélioration
- Céramique:
 - Nitrure de silicium Si_3N_4
 - Zirconia ZrO_2

CAGE

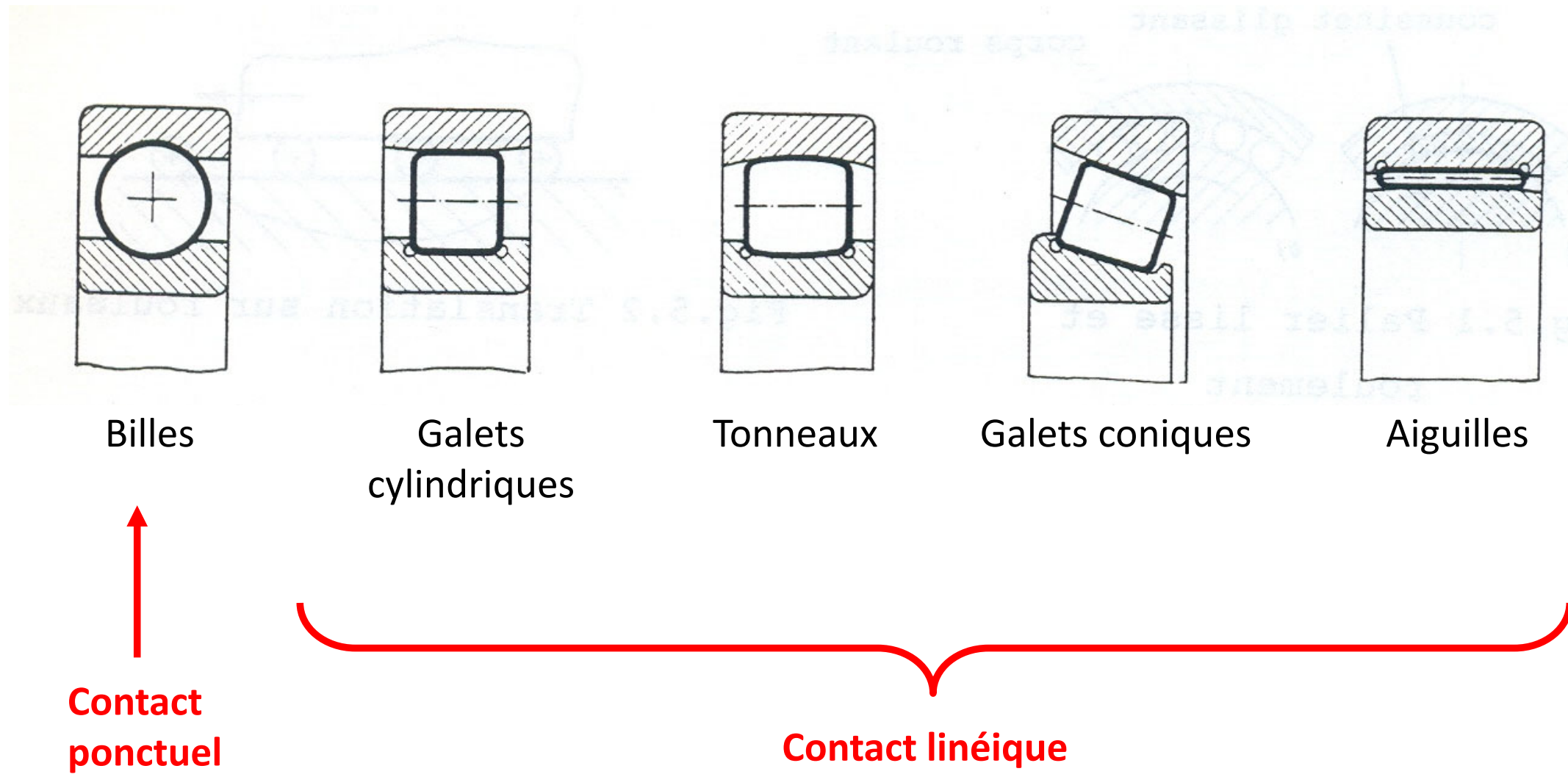
- Polyamide 6.6 renforcé de fibres de verre
- PEEK 450 CA 30: Polyester ester cetone et fibres de carbone
- Laiton
- Acier

BAGUES

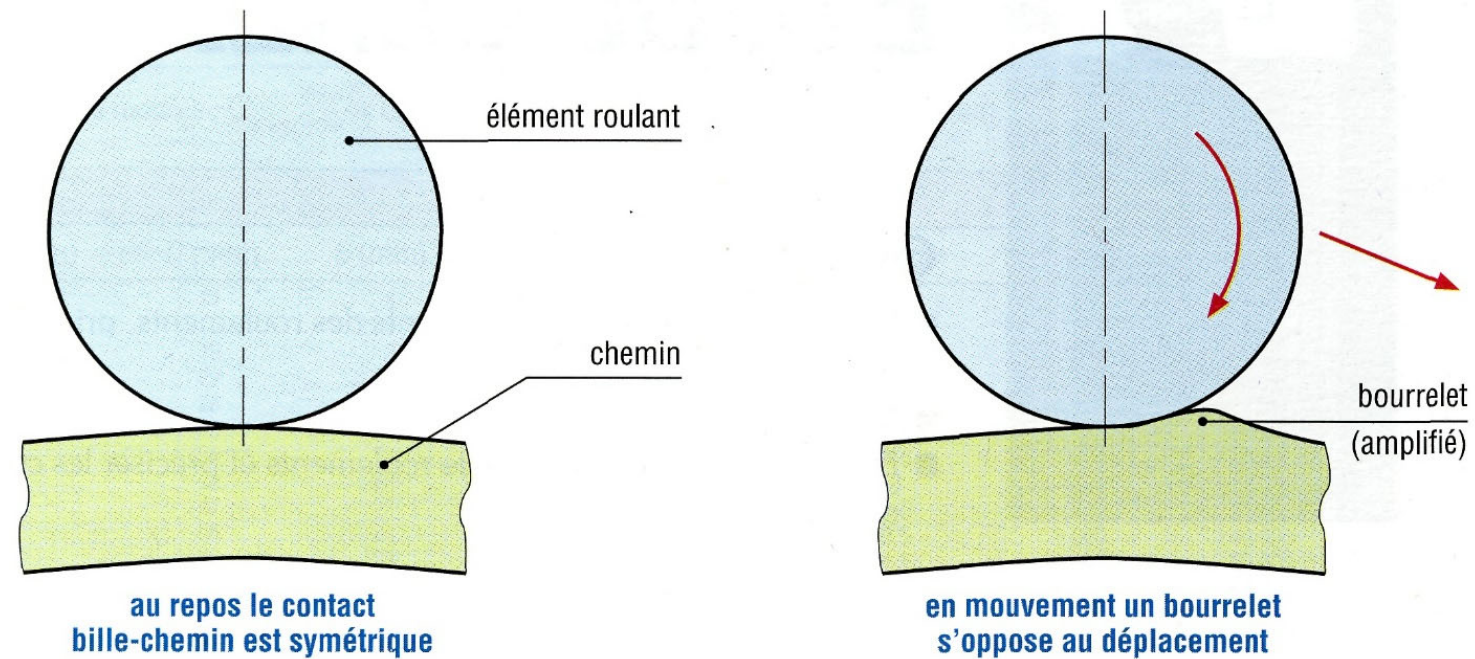
| <i>Correlation 440C/CHROMEX® 40</i> | <i>440C AMS 5618</i> | <i>CHROMEX ® 40 AMS 5925</i> |
|---|------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Tempering Temperature</i> | <i>204°C 480°C</i> | <i>180°C 500°C</i> |
| <i>Grain Size (index)</i> | <i>8</i> | <i>8</i> |
| <i>Max. Carbides size</i> | <i>80µm</i> | <i><30µm</i> |
| <i>Carbides distribution</i> | <i>Banding</i> | <i>Uniform</i> |
| <i>Carbides Morphologie</i> | <i>Angular</i> | <i>Spherical</i> |
| <i>Retained Austenite</i> | <i><10%</i> | <i><10%</i> |
| <i>Corrosion Resistance (in salt spray)</i> | <i>Medium</i> | <i>Excellent</i> |
| <i>Hardness</i> | <i>>58 HRc</i> | <i>>58HRc</i> |

<http://www.youtube.com/watch?v=b6svVy1IYOA>

Géométrie des Corps Roulants

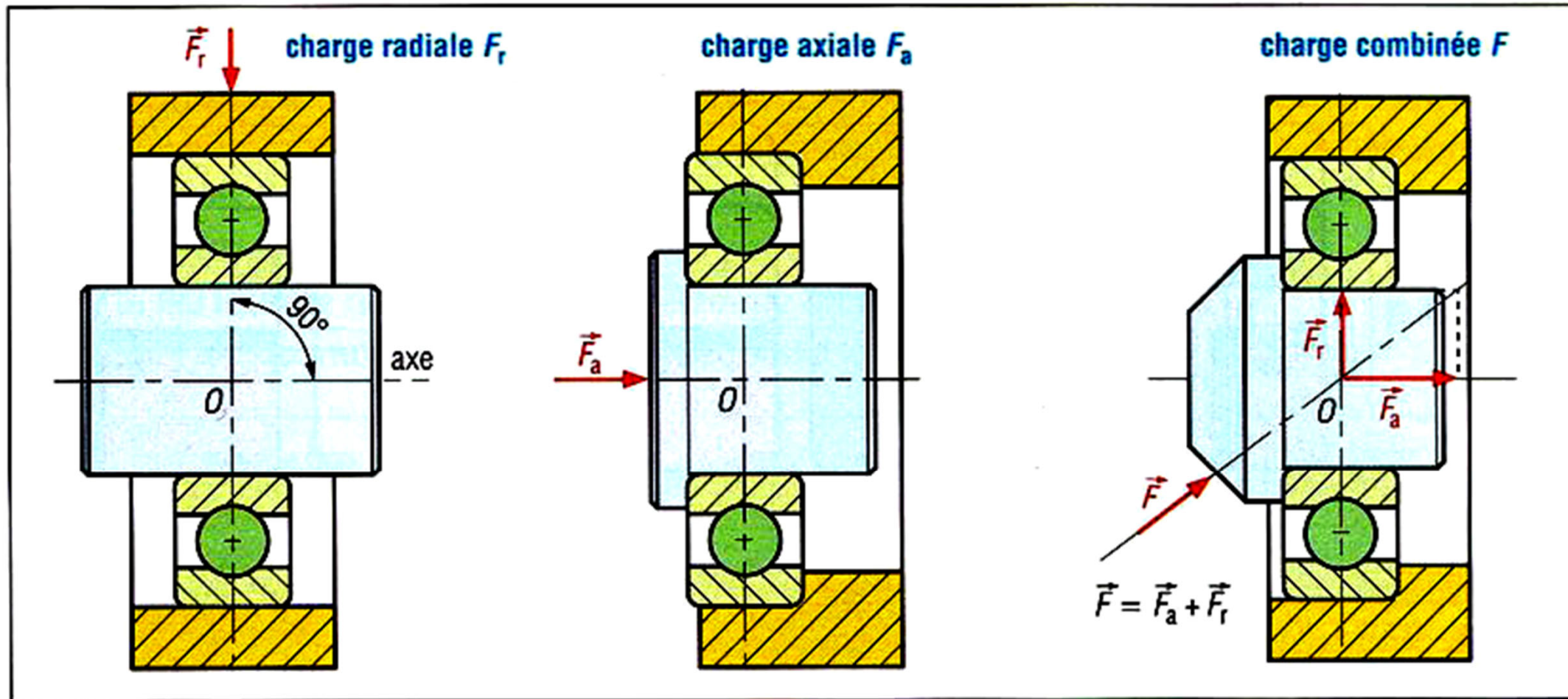


Résistance au roulement



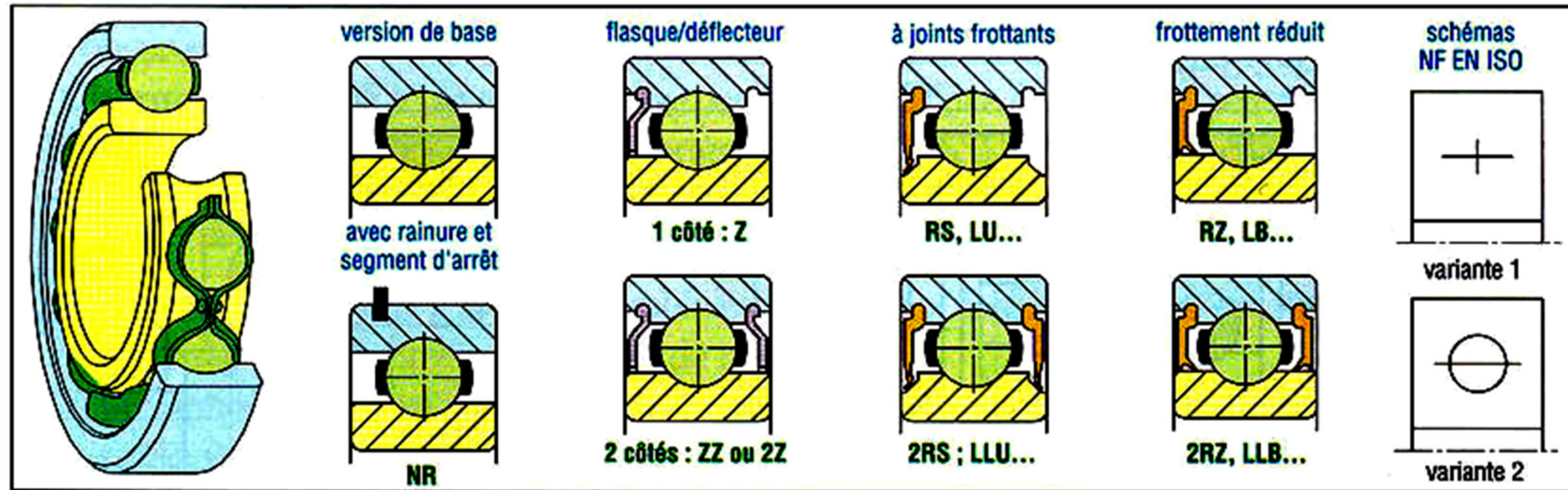
| roulements | rigides à billes | billes contact obl. | rouleaux cyl. | rouleaux coniq. | à aiguilles |
|--------------|------------------|---------------------|---------------|-----------------|-------------|
| f ou μ | 0,0015 | 0,0020 | 0,0011 | 0,0020 | 0,0025 |

Charges supportées par les roulements

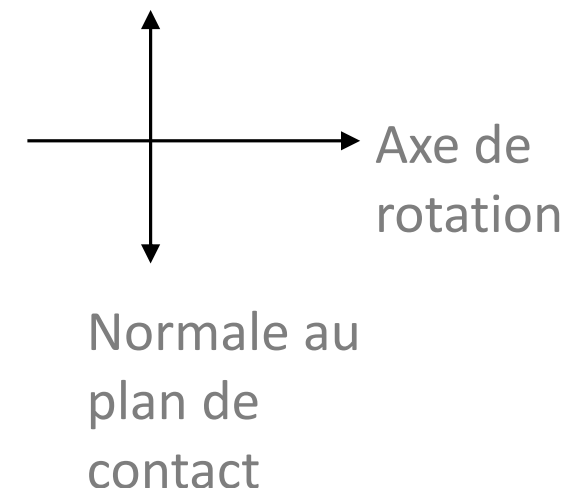


- Le montage et le type de roulement doivent être adaptés à la charge appliquée.
- La charge sur les corps roulants dépend de l'orientation de la charge et des tolérances

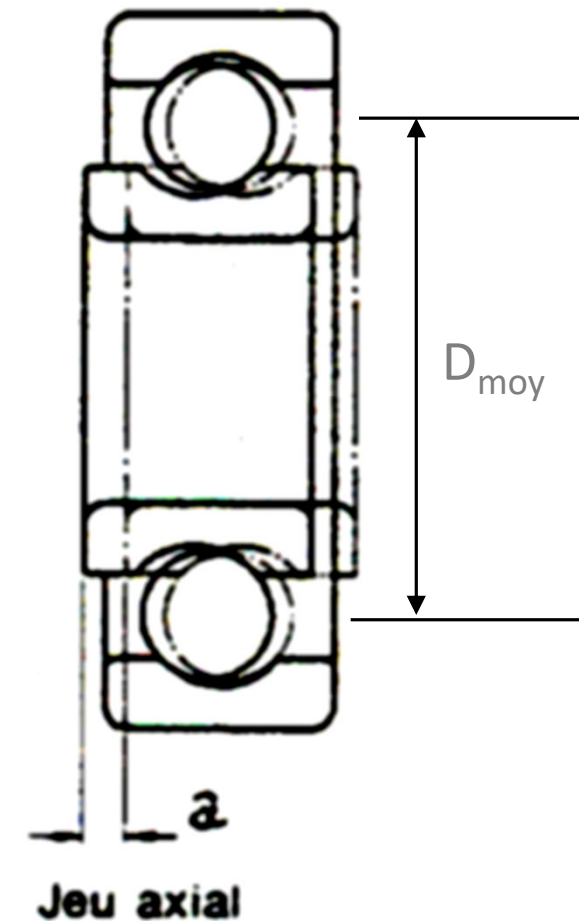
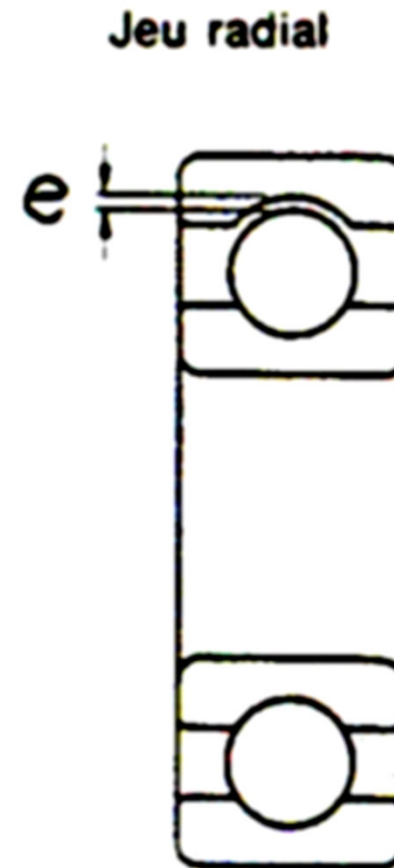
Différents types de roulements:
à billes à contact radial (gorges profondes)



- Supportent des charges
 - d'orientation quelconque
 - modérées à moyennes
- Permettent des vitesses de rotation élevées
- Permettent les meilleures précisions cinématiques
- Diverses exécutions



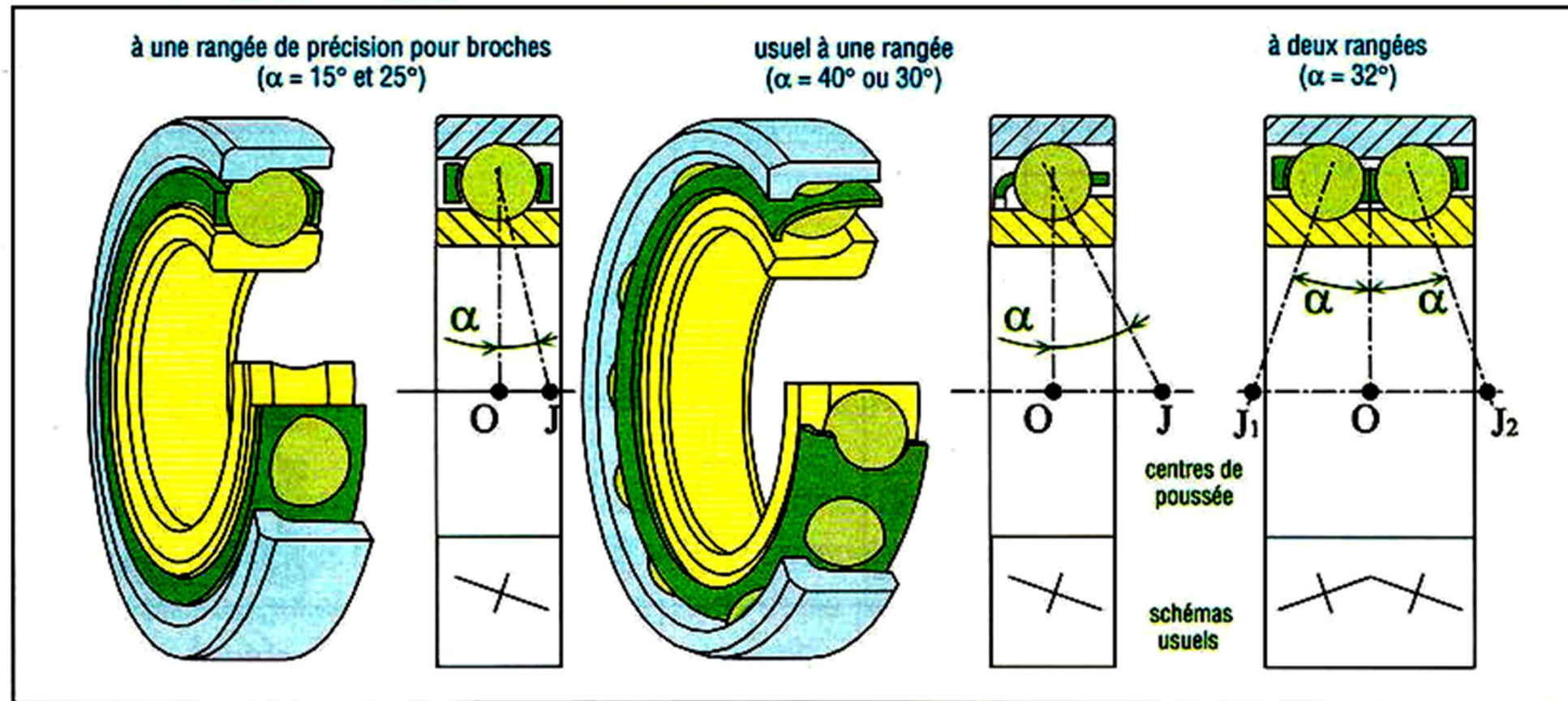
Jeux interne des roulements



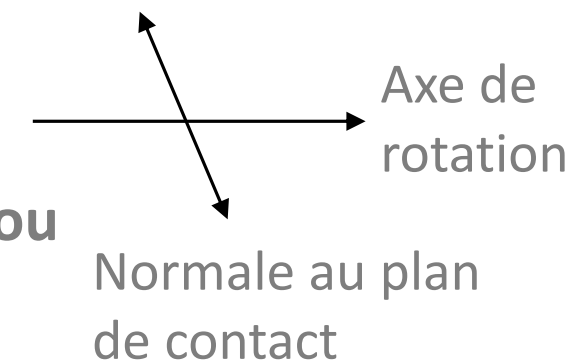
Vitesse caractéristique :

NDm: diamètre moyen (mm) x vitesse de rotation en t/min

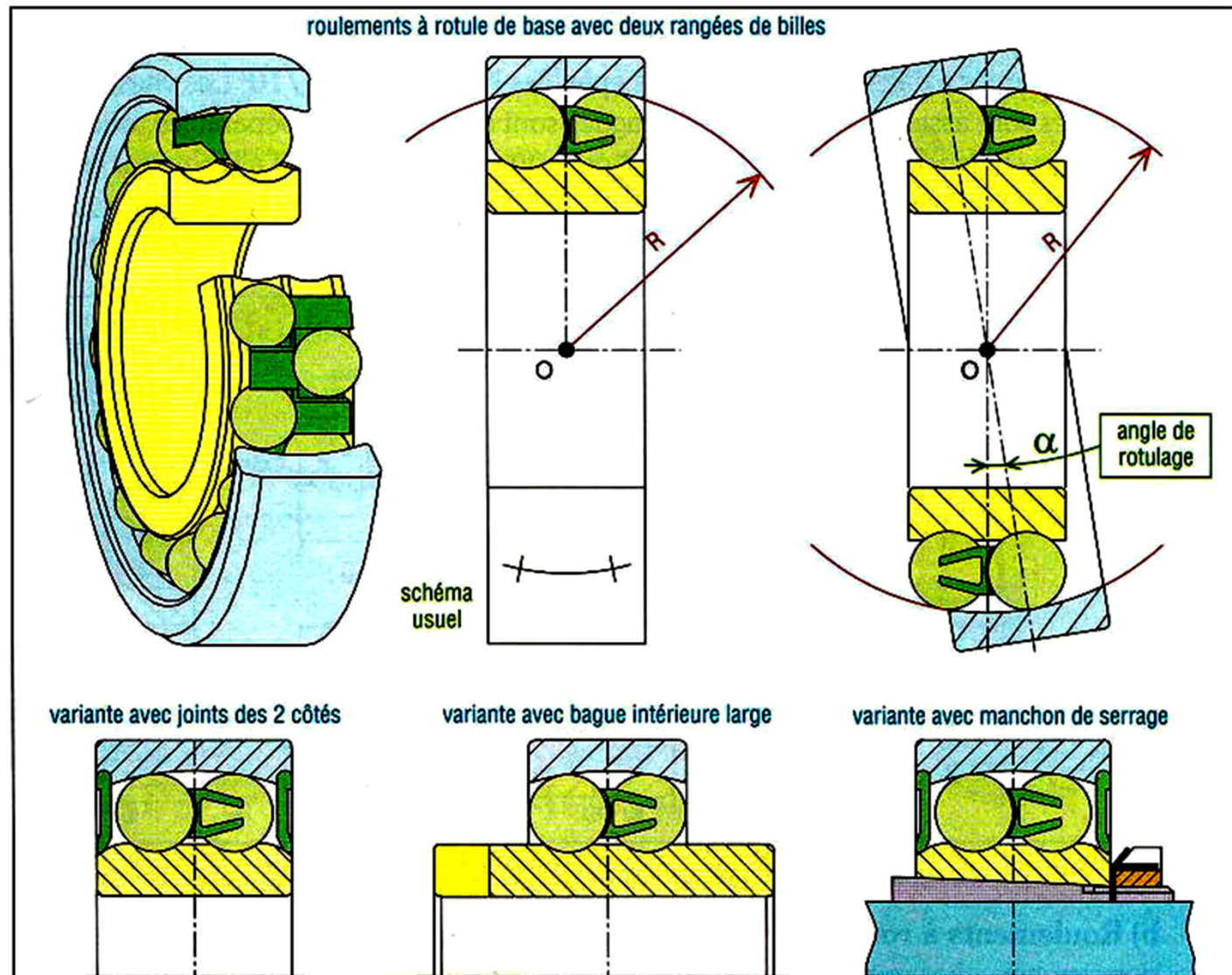
Différents types de roulements: à billes à contact oblique



- Ne supportent des charges axiales que dans une direction
- Deux roulements montés en opposition (précharge) ou un roulement à deux rangées

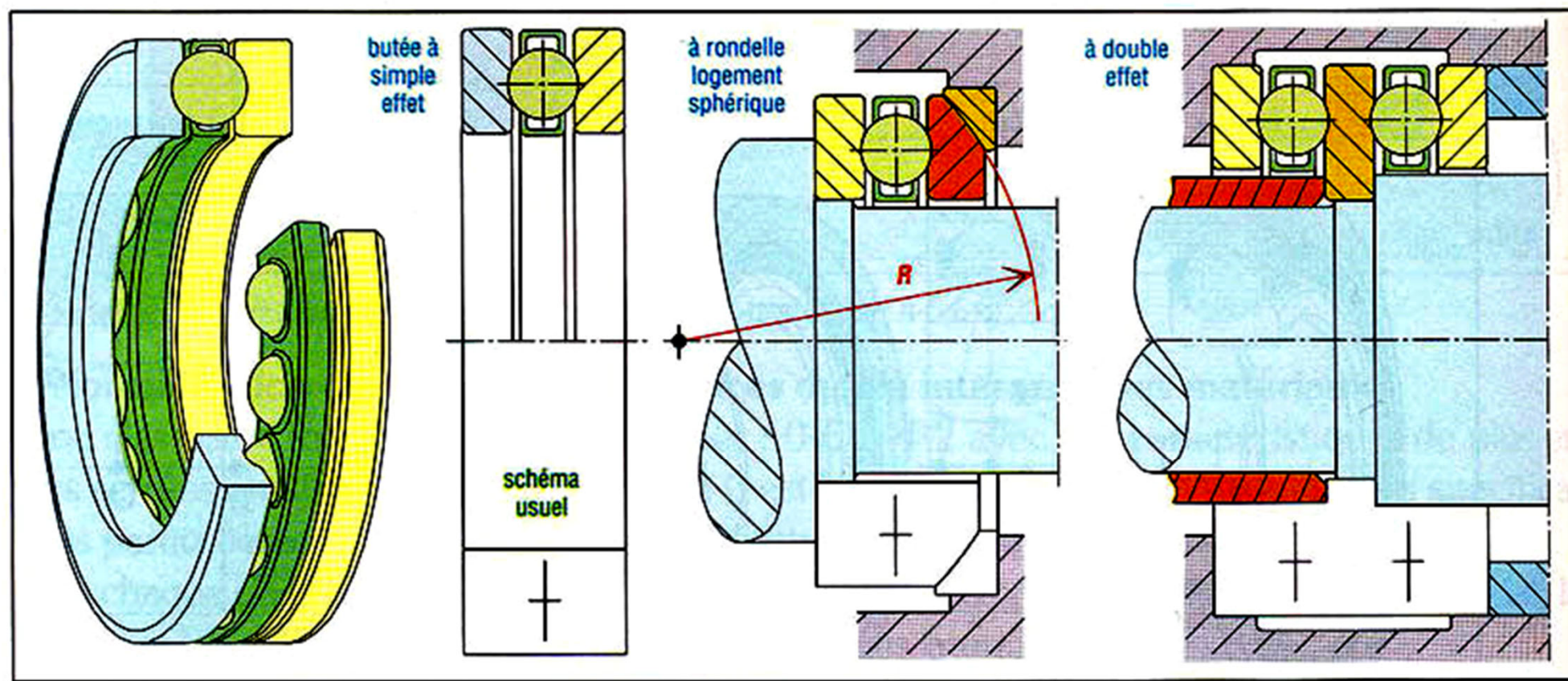


Différents types de roulements: à rotule sur billes

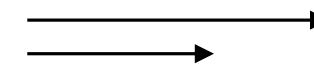


- Permettent le rotulage (flexion de l'arbre et défaut d'alignement des portées de palier)
- Angle de rotulage: $2,5 - 4^\circ$
- Ne supportent que de faibles charges axiales

Différents types de roulements: butées à billes

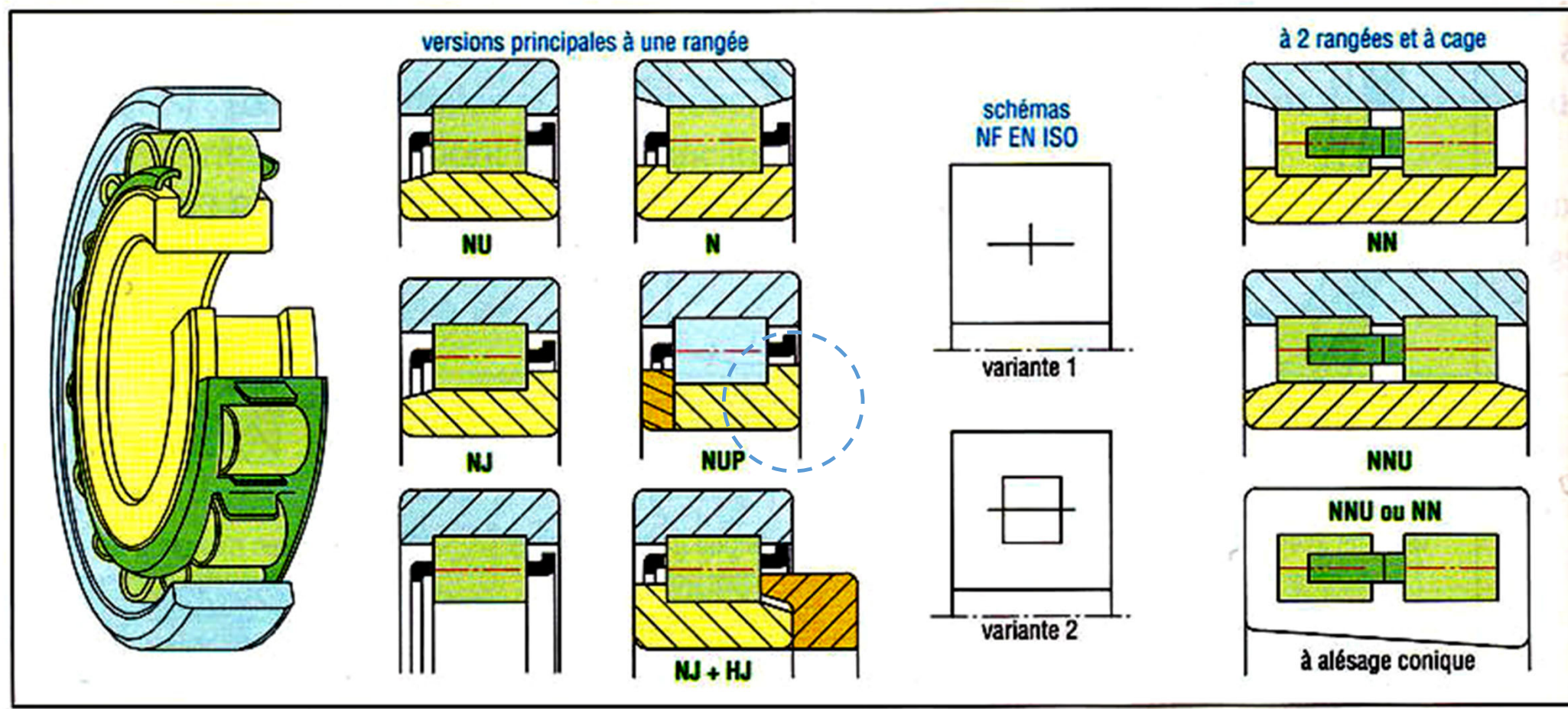


- Ne supportent des charges axiales que dans un sens
- Vitesse limitée
- Pas de centrage de l'arbre



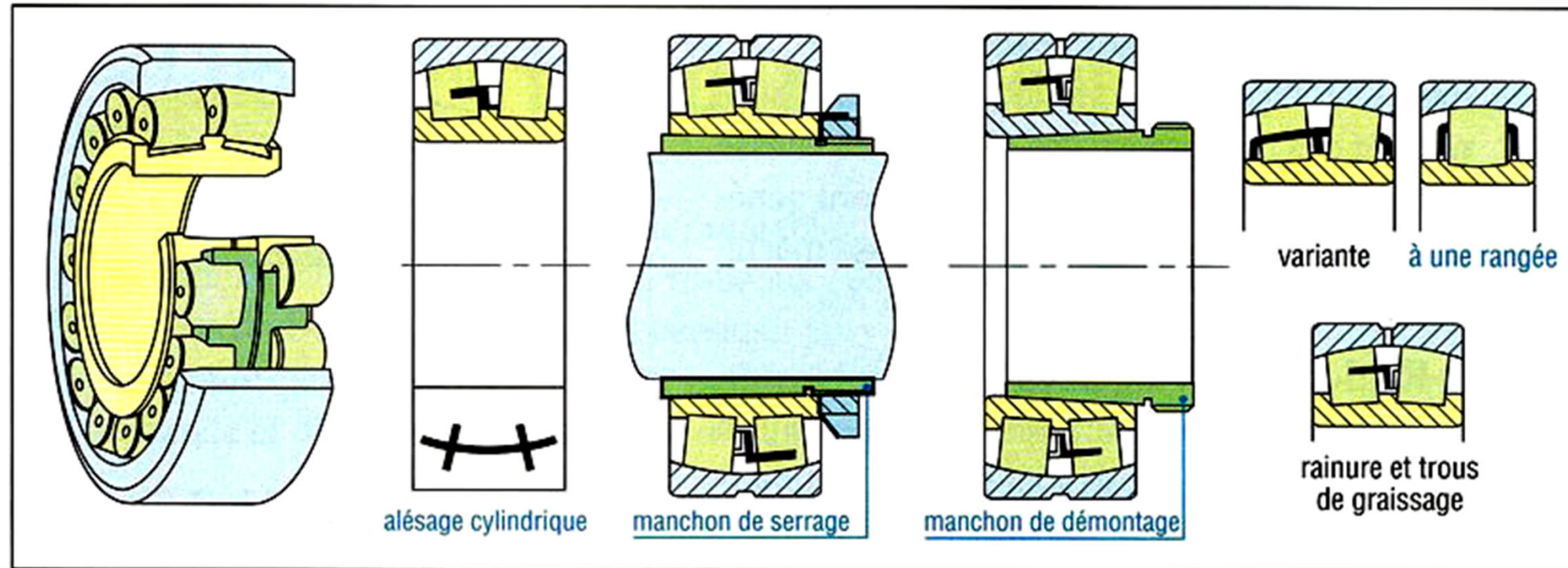
Axe de rotation et
normale au plan de
contact coïncident

Différents types de roulements: à rouleaux cylindriques



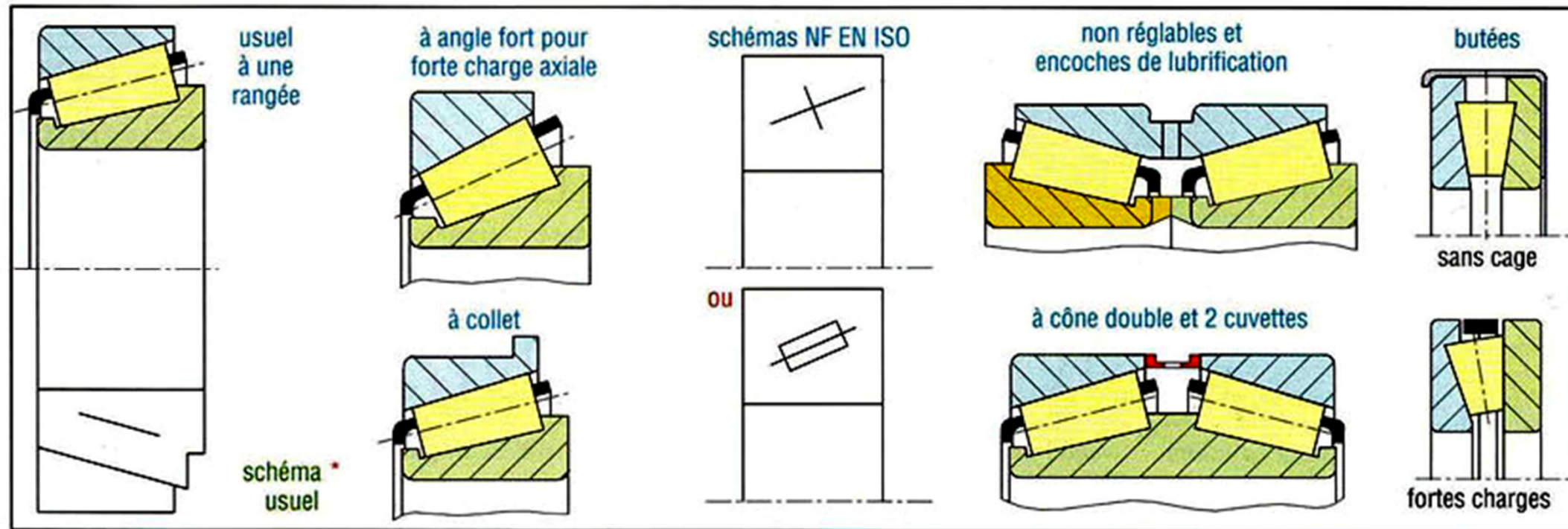
- Capacité de charge radiale élevée,
- Pas de charge axiale
- Vitesse et précision réduites
- Ne permettent ni rotulage ni désalignement des alésages

Différents types de roulements: à rotule sur rouleaux (tonnelets)



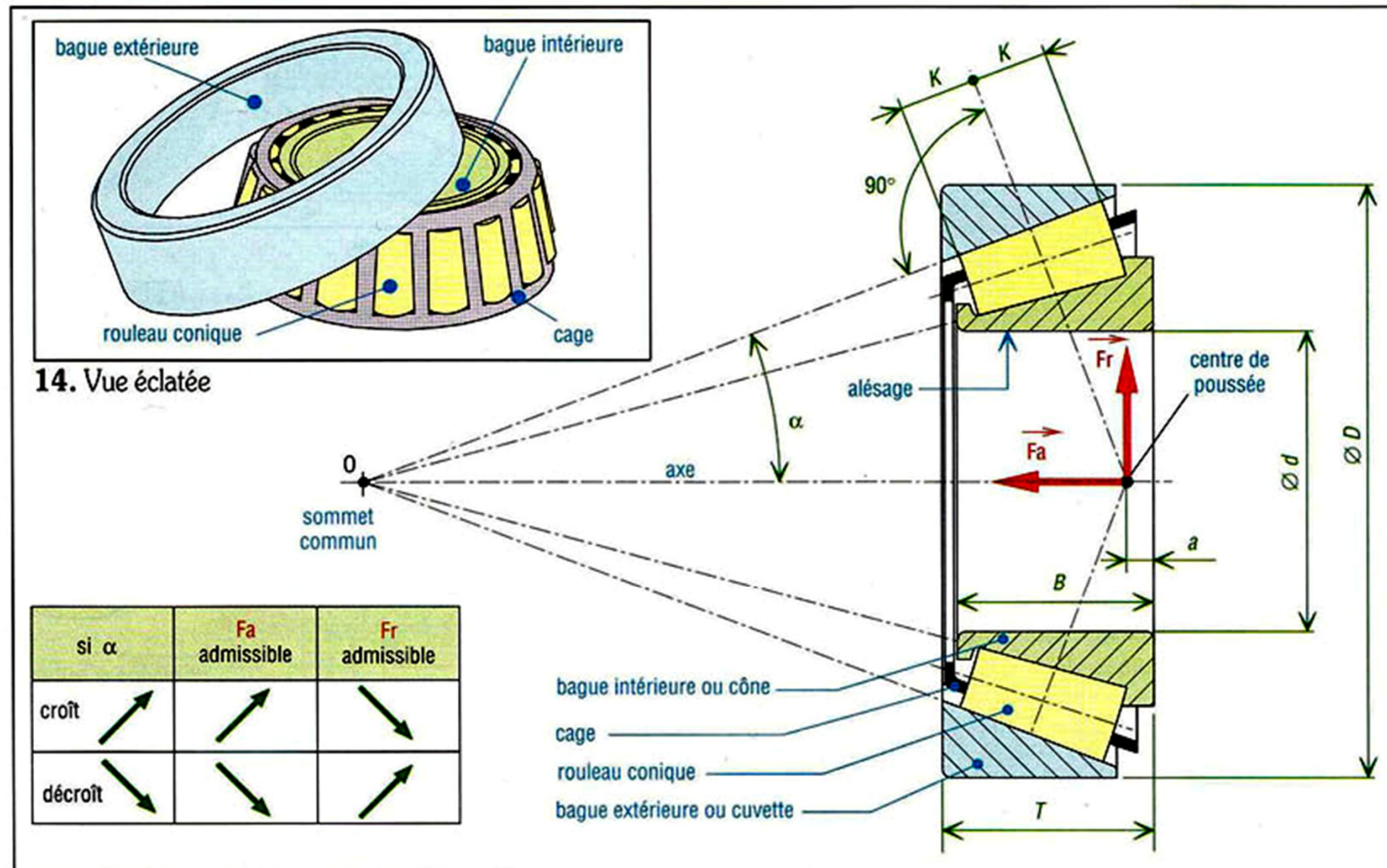
- Capacité de charge radiale élevée,
- Pas de charge axiale
- Vitesse et précision réduites
- Permettent rotulage et désalignement des alésages
- Demande une lubrification à l'huile

Différents types de roulements: à rouleaux (galets) coniques

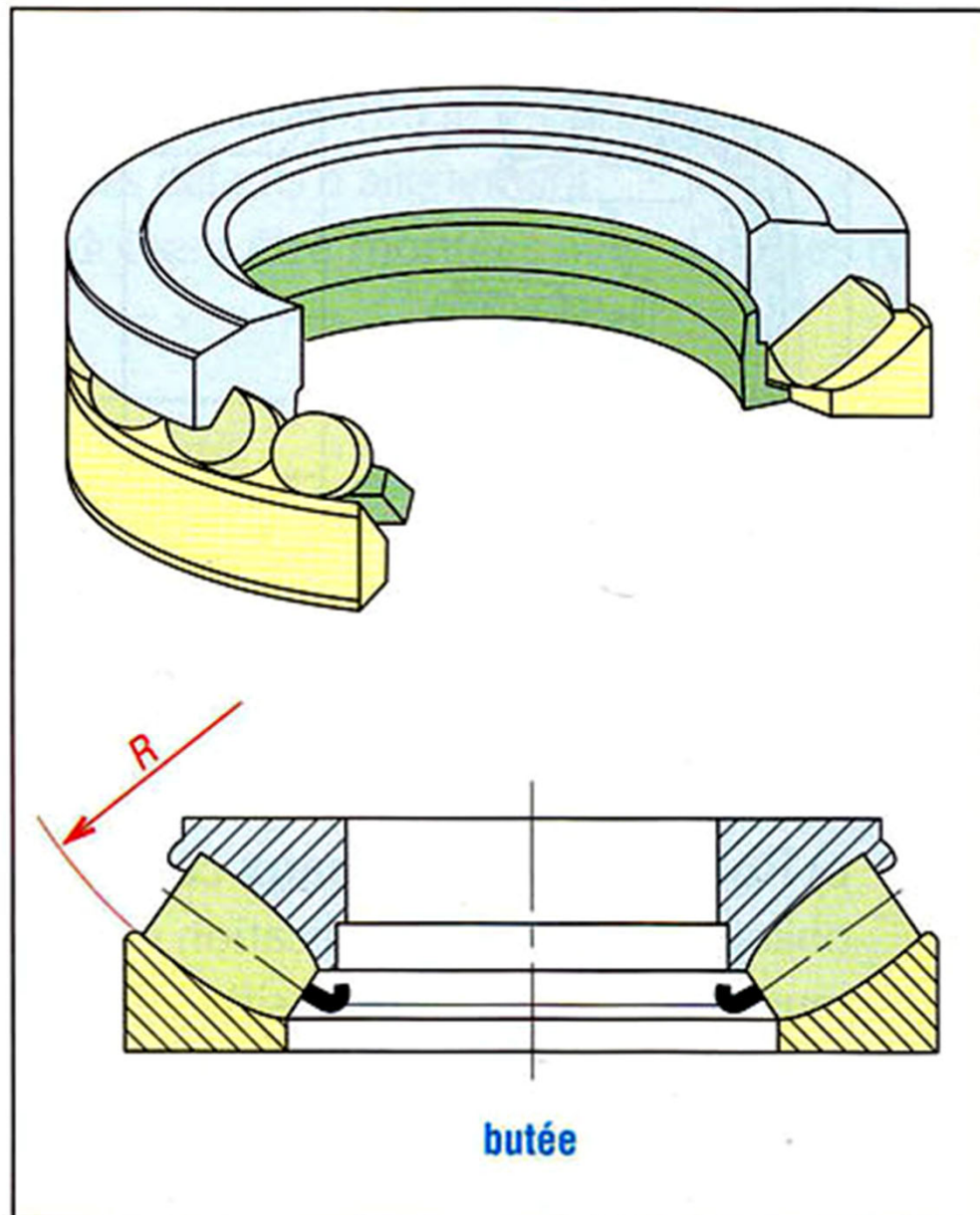


- Ne supportent des charges axiales que dans une direction
- Deux roulements montés en opposition (précharge) ou un roulement à deux rangées
- Vitesses de rotation moyennes

Différents types de roulements: à rouleaux (galets) coniques



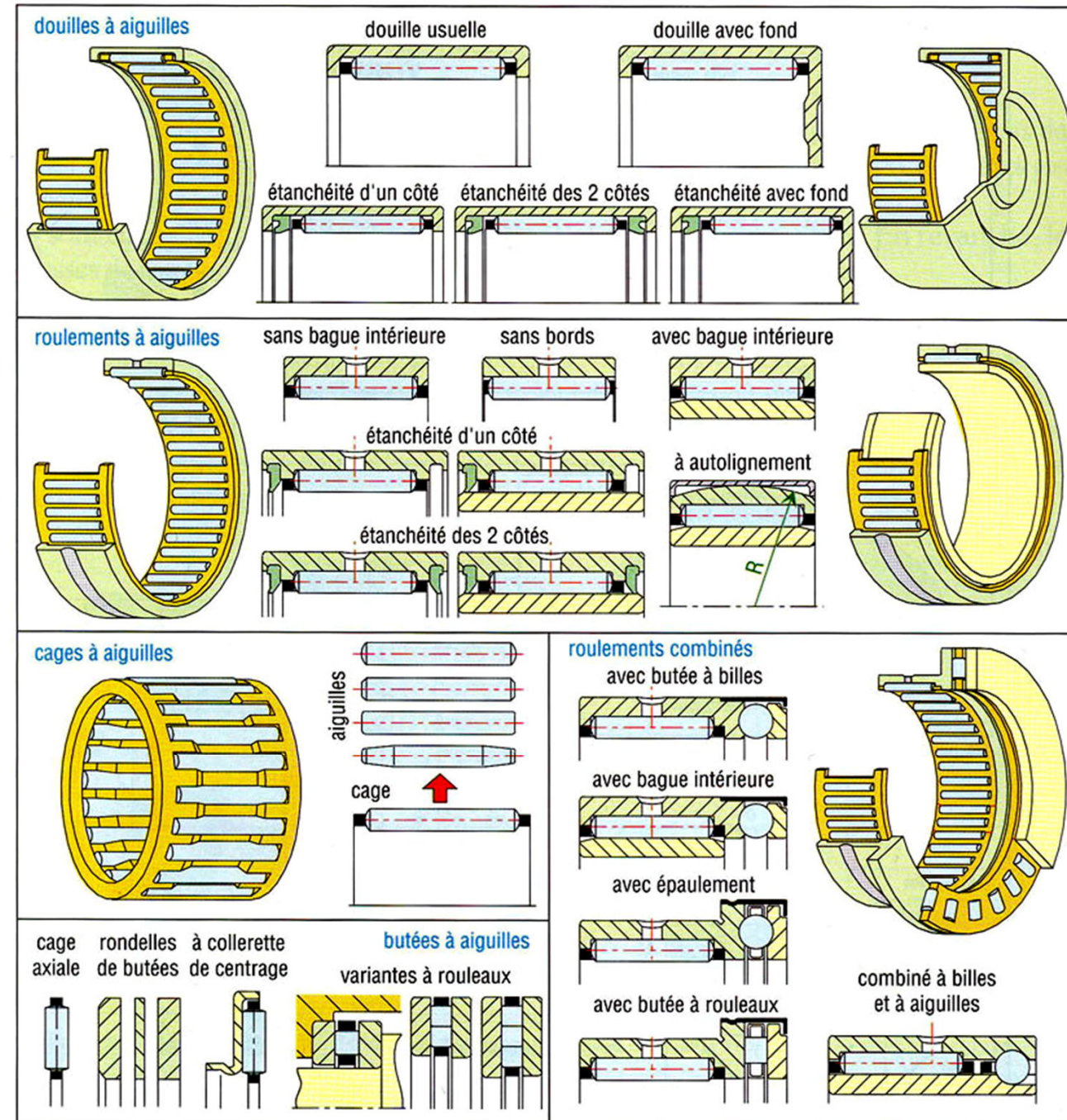
Différents types de roulements:
Butées à rotule sur rouleaux



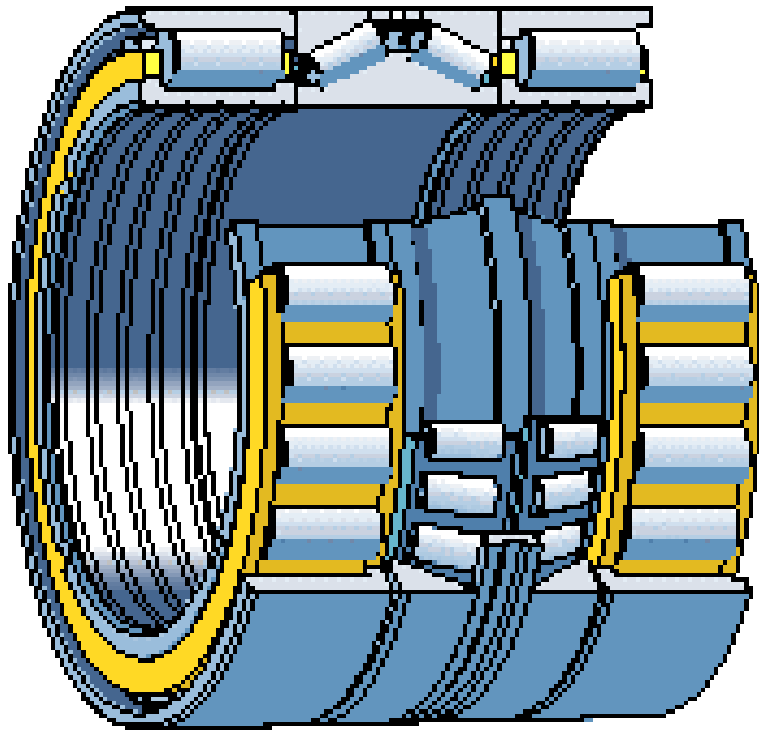
- Réalisent une rotule
- Capacité de charge axiale élevée
- Vitesses de rotation moyennes
- Lubrification à l'huile

Différents types de roulements à aiguilles

- Utilisation similaire à celle des rouleaux cylindriques
- Ne reprennent que des charges radiales
- Encombrement radial faible

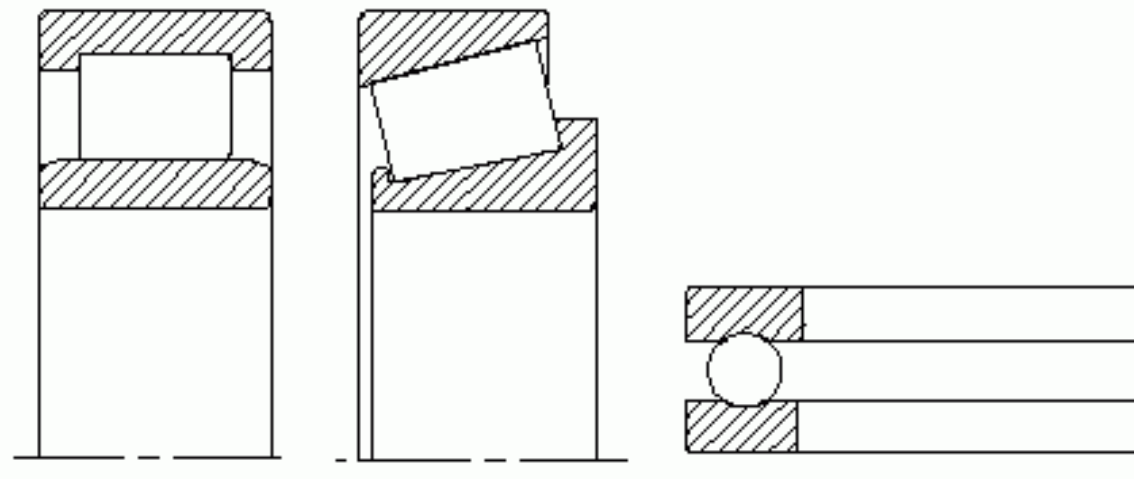


Différents types de roulements:
Roulements combinés



Différents types de roulements:

Roulements séparables:

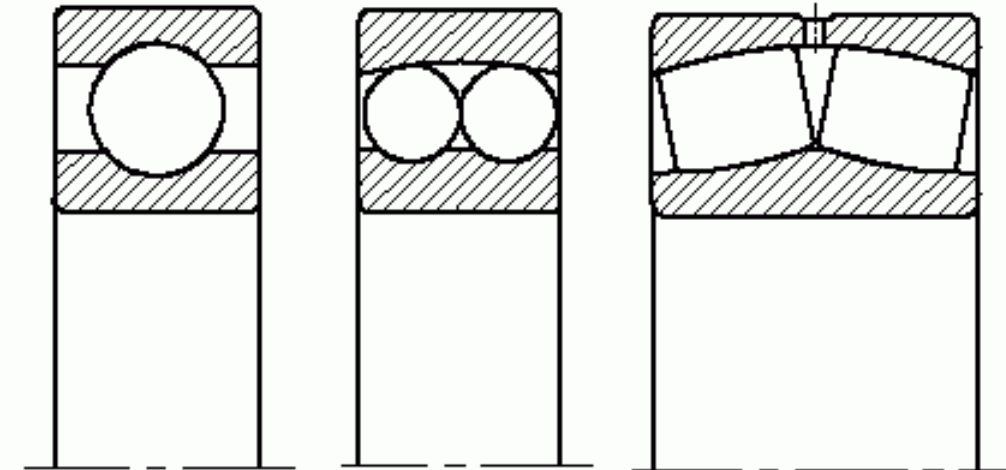


a

b

c

non séparables:

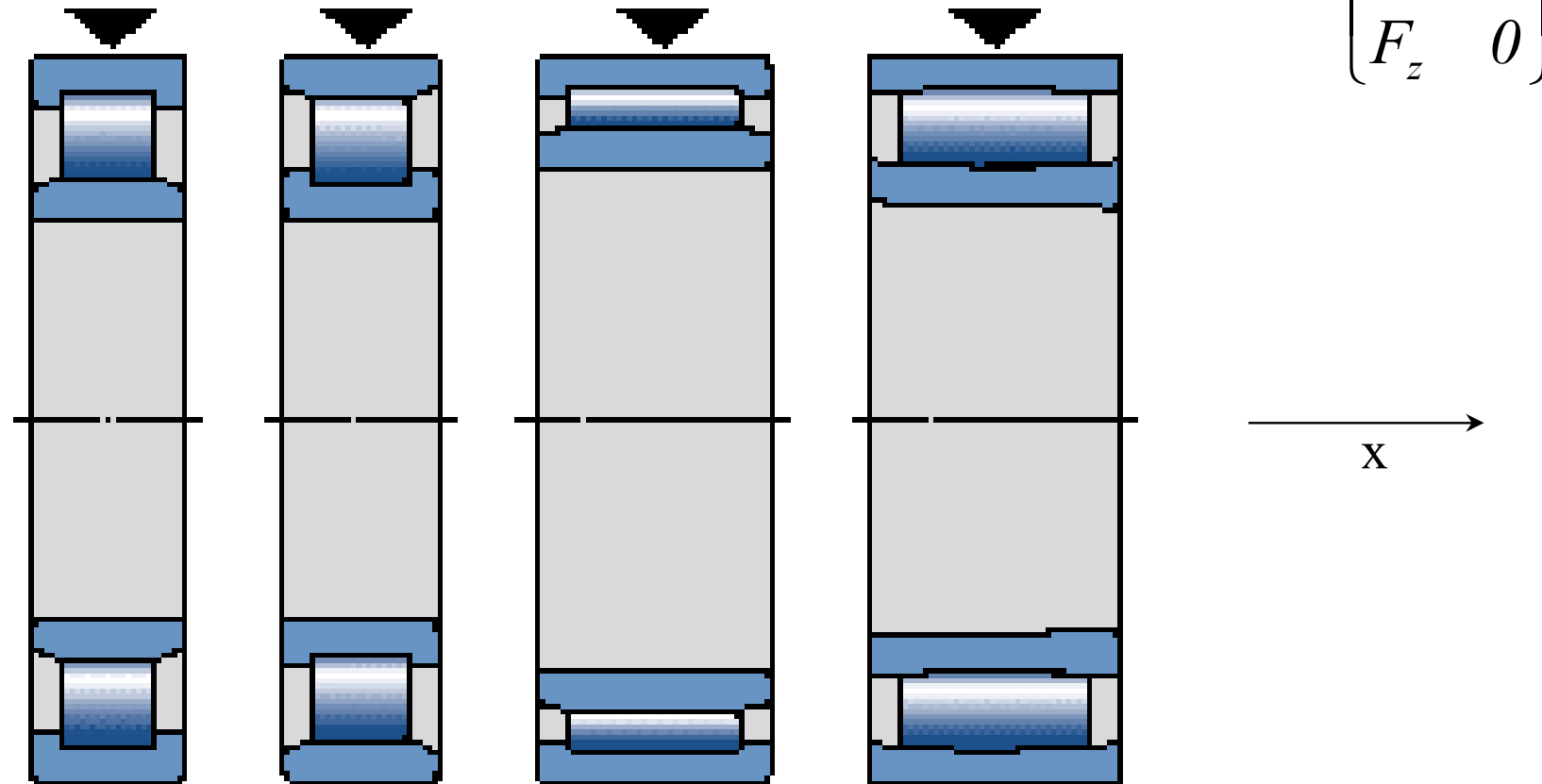


a

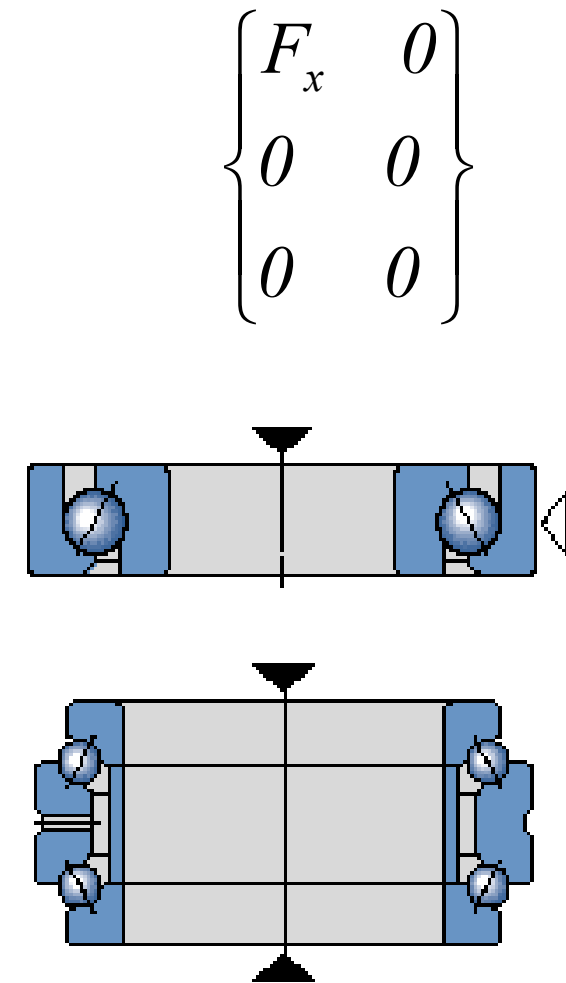
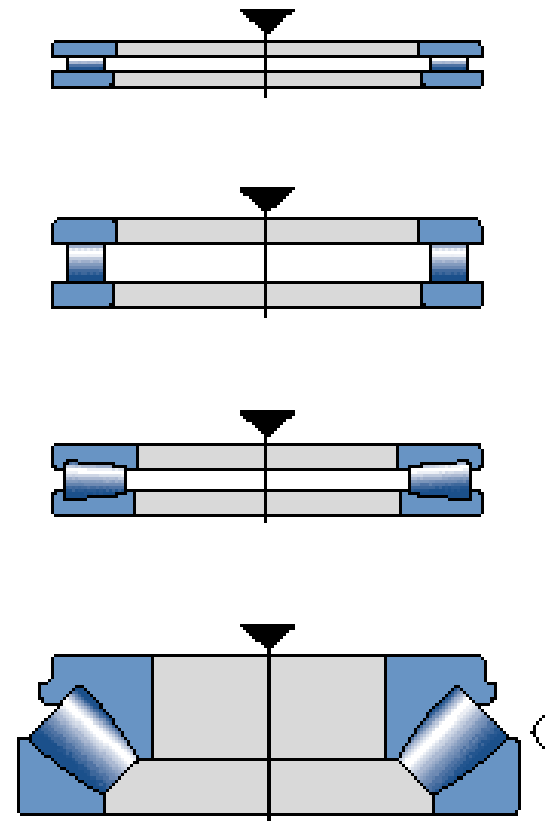
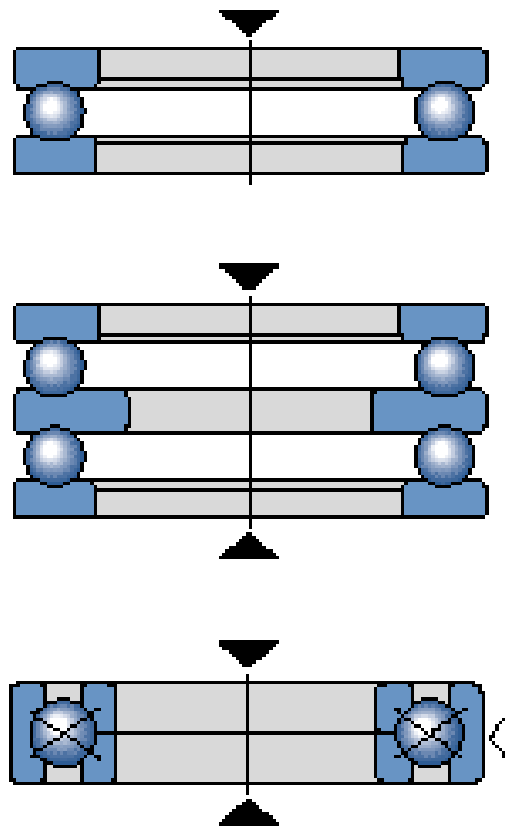
b

c

Différents types de roulements:
Charges radiales



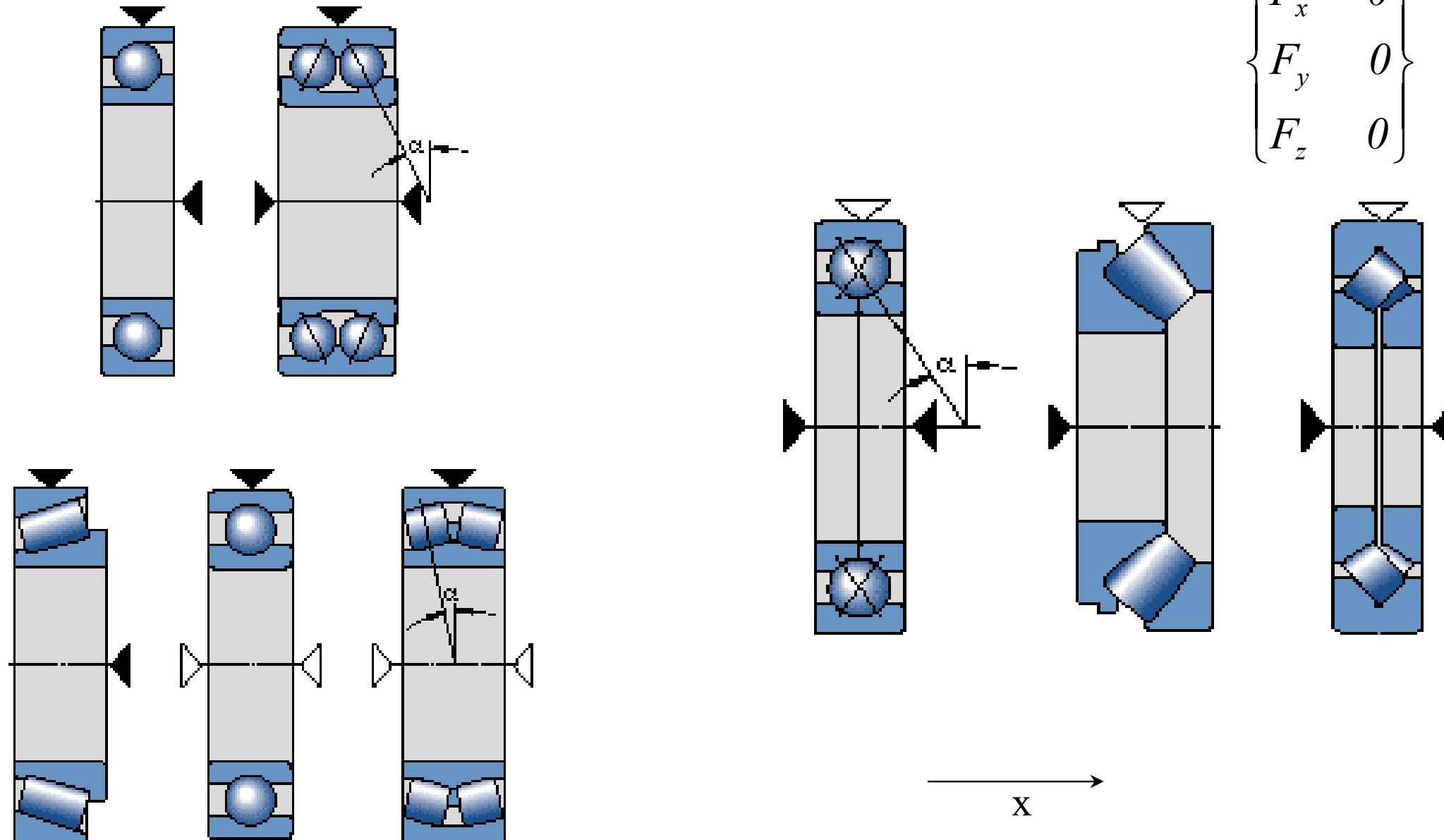
Différents types de roulements:
Charges axiales



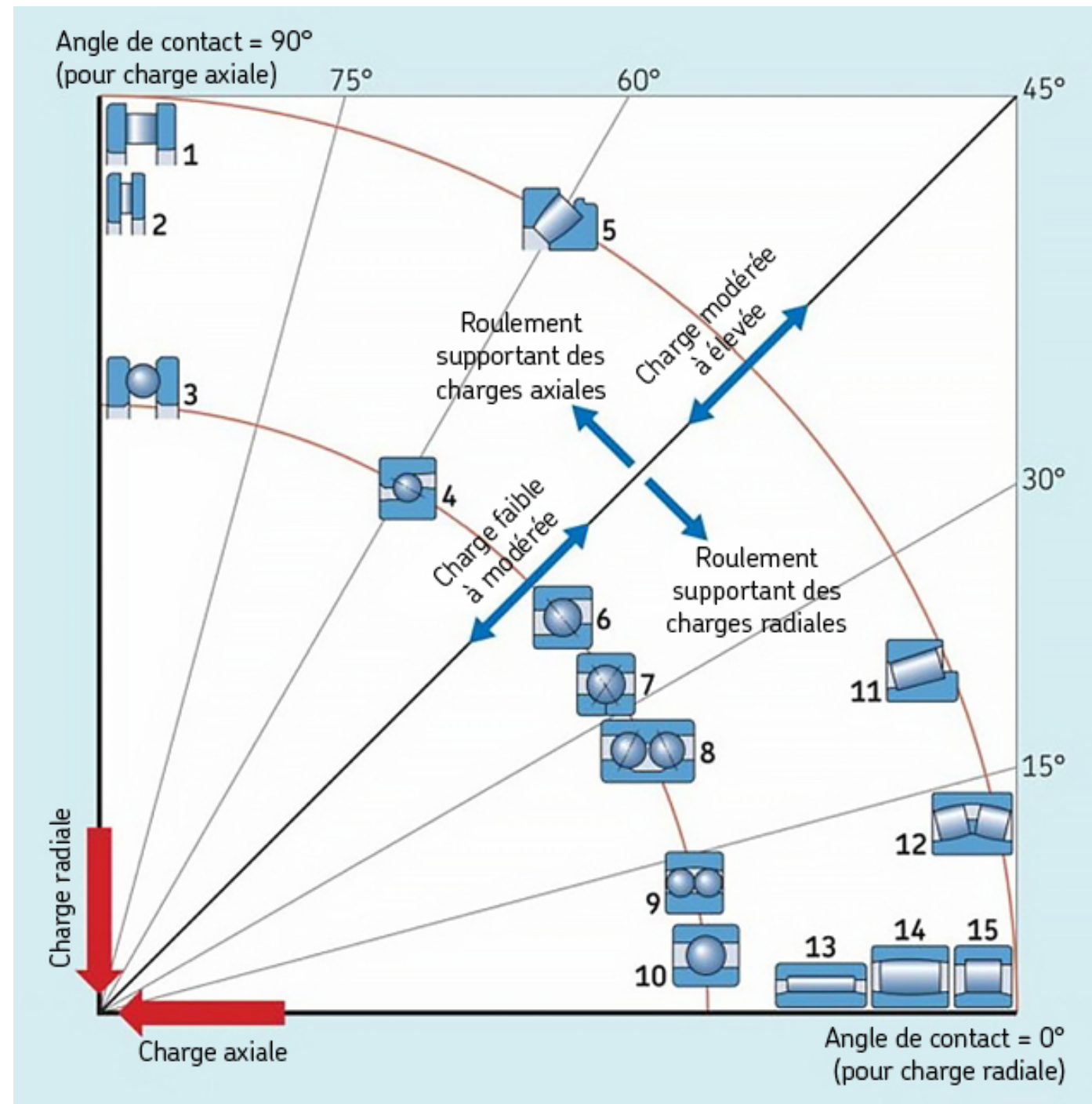
$$\begin{Bmatrix} F_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

x

Différents types de roulements:
Charges combinées



Différents types de roulements:



Choix d'un type de roulement

Selon calcul des roulements

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...



Choix d'un type de roulement

| Guide comparatif des principaux roulements de base | | charges admissibles | | | aptitude à la vitesse | fonctionnement silencieux | rigidité élevée | aptitude au désalignement | angle de rotulage |
|--|--------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| | | radiale | axiale | combinée | | | | | |
| roulements à billes | une rangée à contact radial | ** | * | ** | **** | **** | * | * | 2 à 16° |
| | une rangée à contact oblique | ** | 15° ** ← *** 40° | 15° ** 40° *** | **** | *** | * | * | 1 à 2° |
| | deux rangées à contact oblique | *** | ** ↔ | *** | ** | * | ** | 0 | ≈ 0 |
| | sphérique à auto-alignement | * | * à ≈ 0 ↔ | * | ** | * | 0 | *** | 2 à 4° |
| | butée à une rangée | 0 | ** ← | 0 | * | * | * | 0 | 0 |

| Guide comparatif des principaux roulements de base | | charges admissibles | | | aptitude à la vitesse | fonctionnement silencieux | rigidité élevée | aptitude au désalignement | angle de rotulage |
|--|-----------------------------|---------------------|----------|----------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| | | radiale | axiale | combinée | | | | | |
| roulements à rouleaux | cylindrique à une rangée | **** | 0 | 0 | **** | ** | *** | * | 1 à 7° |
| | conique à une rangée | *** | *** ← | **** | **** | ** | ** | * | 1 à 4° |
| | sphérique à auto-alignement | **** | ** ↔ | **** | ** | * | *** | *** | 0,5 à 2° |
| | à aiguilles | *** | 0 | 0 | **** | ** | ** | 0 | 0 à 2° |
| | | ↔ 2 sens | ← 1 sens | **** excellent | *** bon | ** moyen | * faible | 0 inadapté | |

Exercice: types et fonctions des roulements

- Le réducteur à train planétaire et vis sans fin illustré ci-contre comporte 5 paliers.
- Indiquer le type de chaque palier et la nature de la charge qu'il peut supporter.

Palier 1: _____

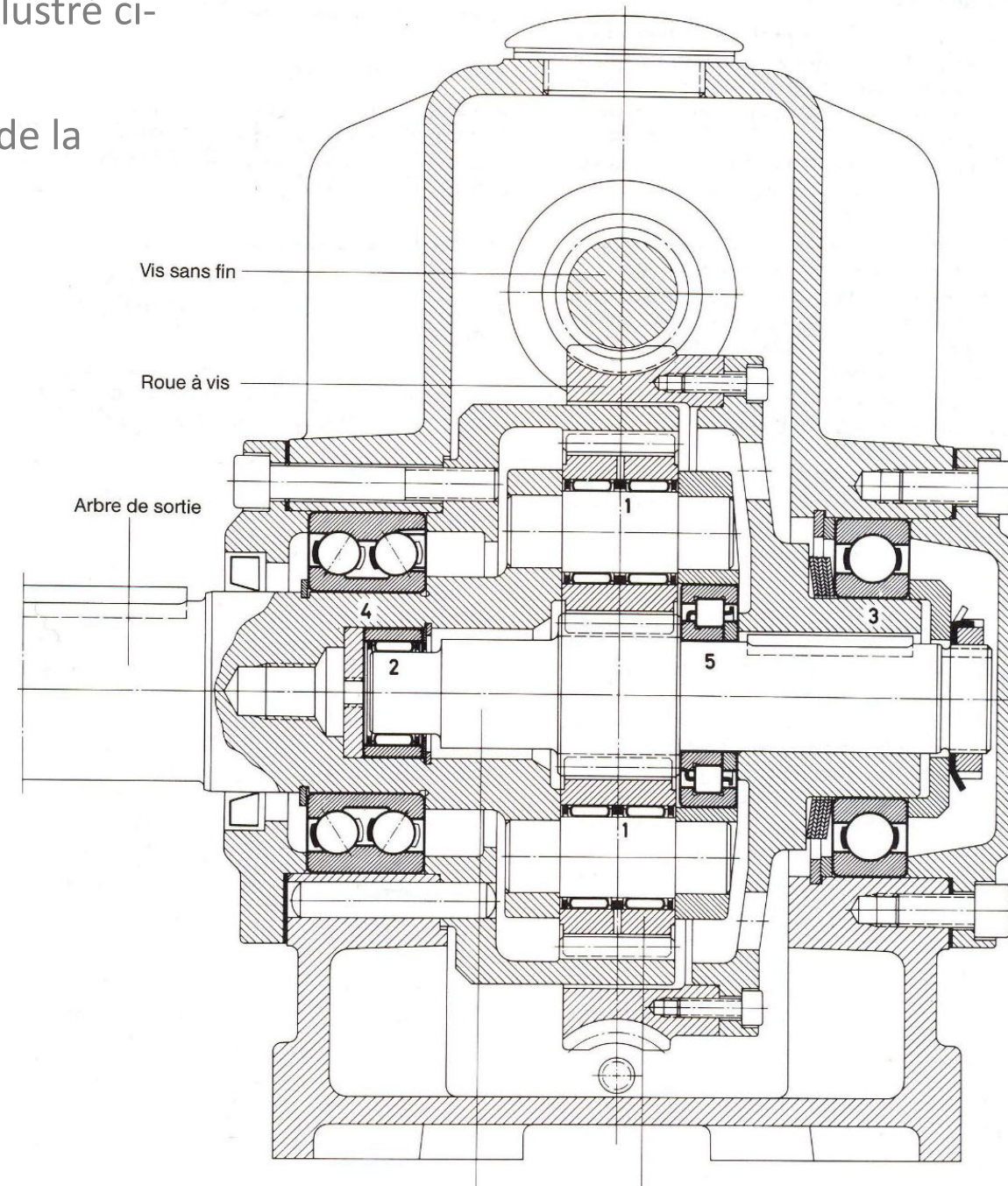
Palier 2: _____

Palier 3: _____

Palier 4: _____

Palier 5: _____

Quels roulements ne comportent pas de bague intérieure?



Exercice: types et fonctions des roulements

- Le réducteur à train planétaire et vis sans fin illustré ci-contre comporte 5 paliers.
- Indiquer le type de chaque palier et la nature de la charge qu'il peut supporter.

Palier 1: Cages a aiguilles

Charges radiales

Palier 2: Douille a aiguilles

Charges radiales

Palier 3: Roulement a billes a contact radial

Charges radiales et axiales

Palier 4: Roulement a deux rangées a contact oblique

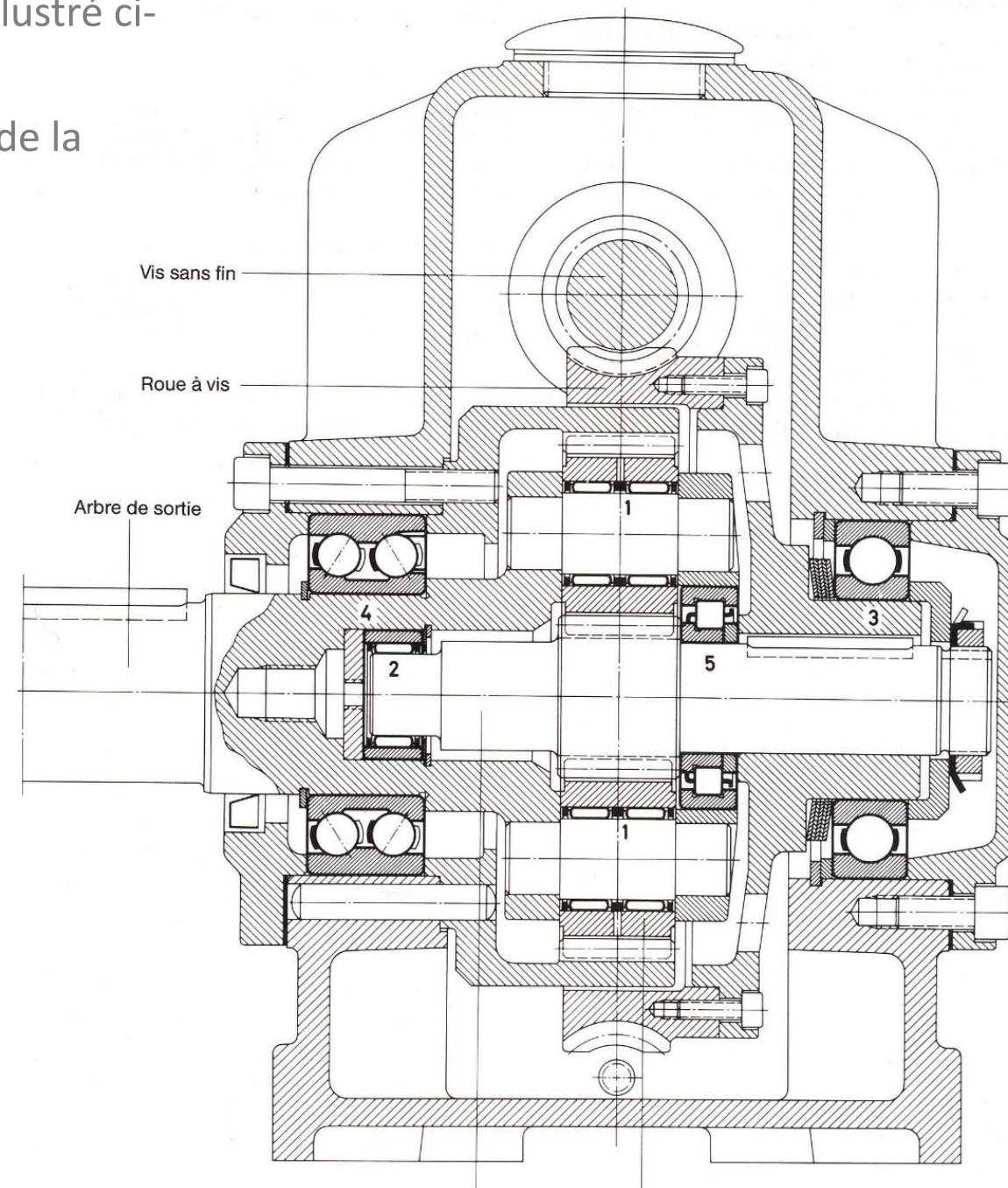
Charges radiales et axiales

Palier 5: Roulement cylindrique a une rangée

Charges radiales

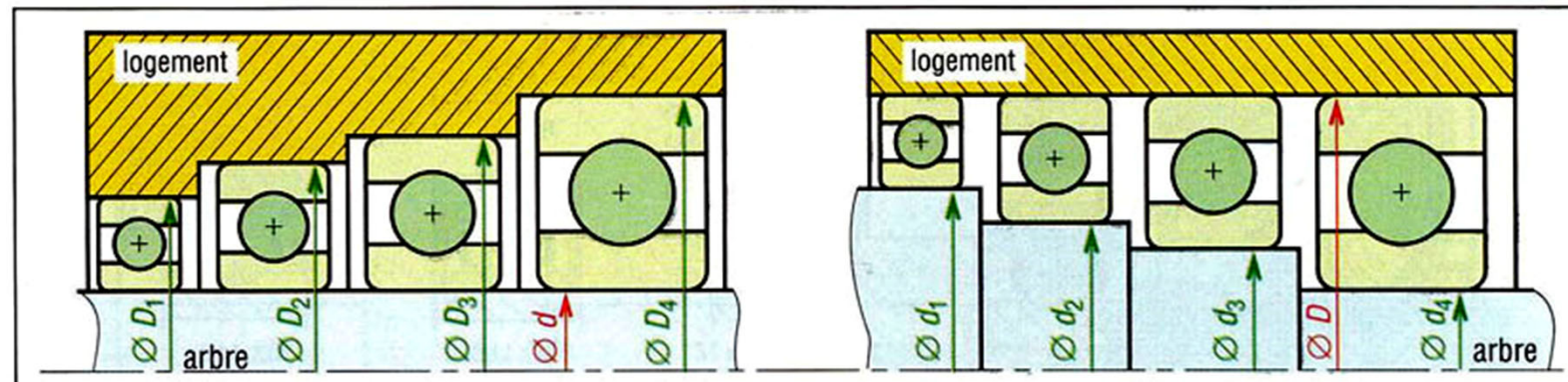
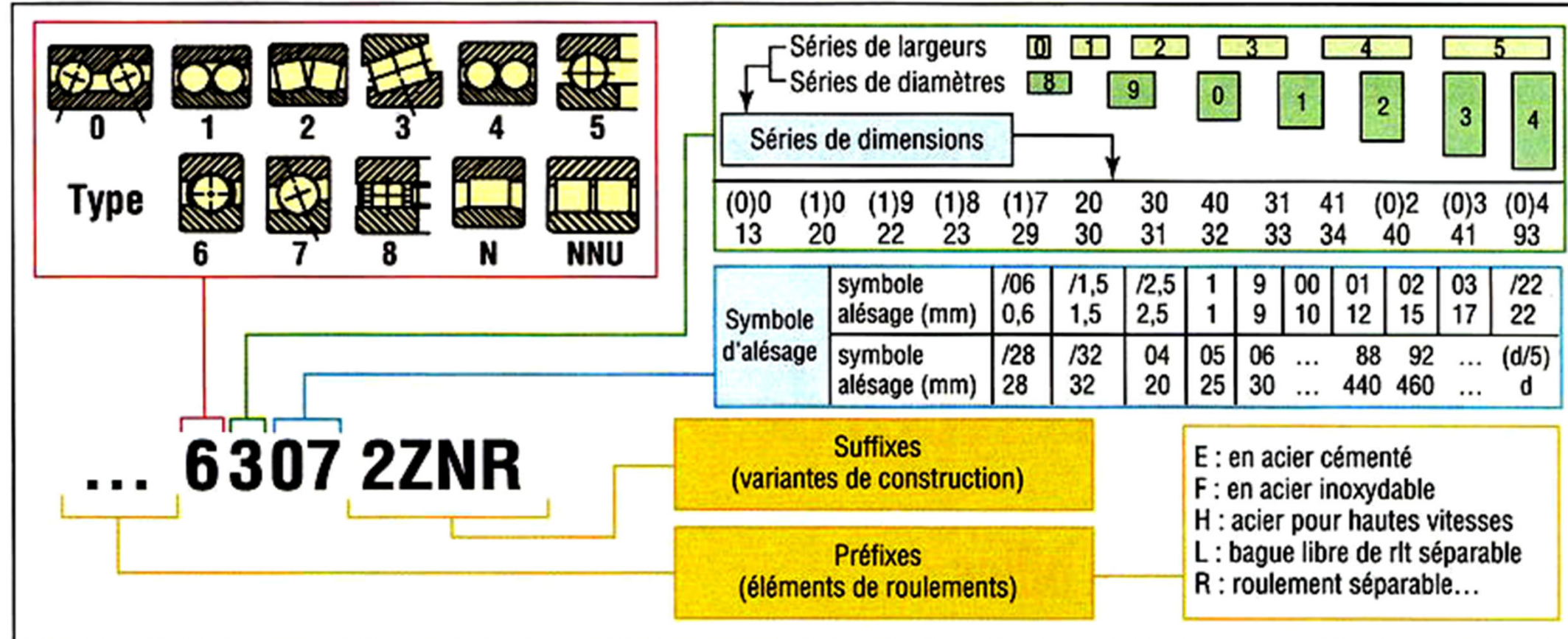
Quels roulements ne comportent pas de bague intérieure?

1, 2

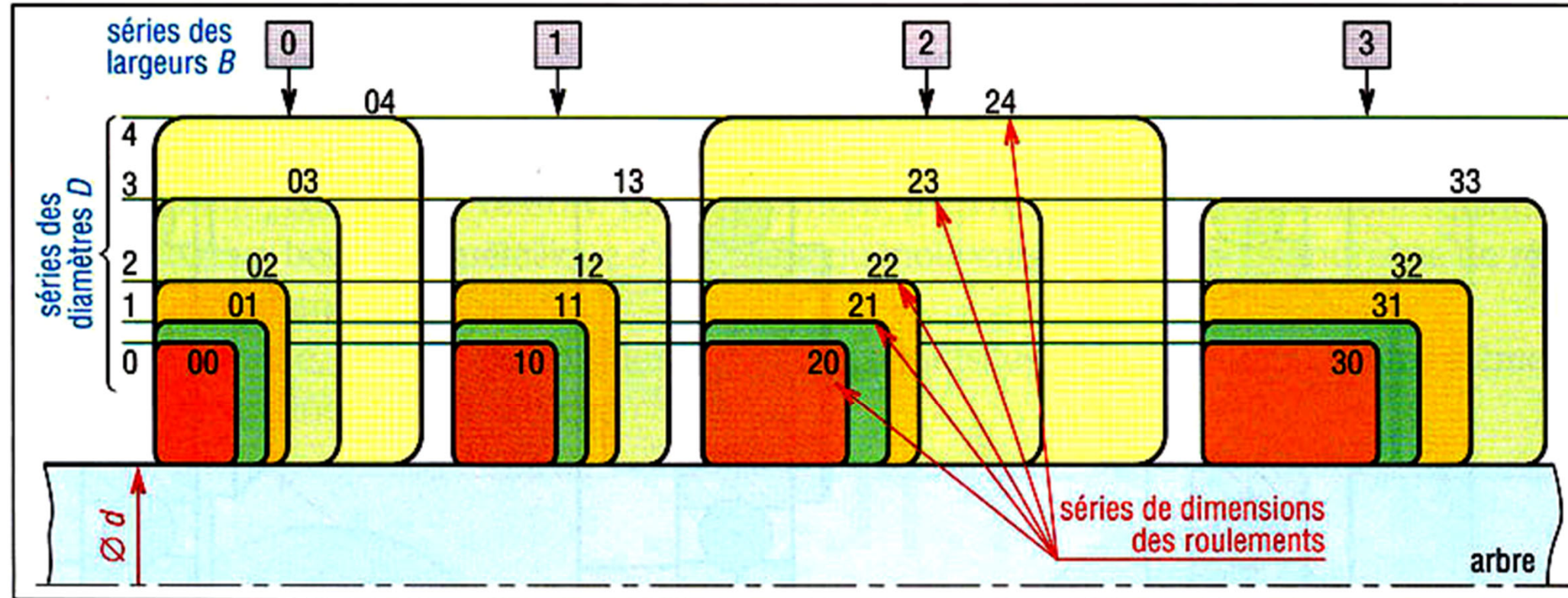


Normalisation internationale des roulements (ISO 492, 199, 578, 1224)

6=Rlt a billes a contact radial, 3=(0)3: largeur=0 d=3, 07=D/5: D=35



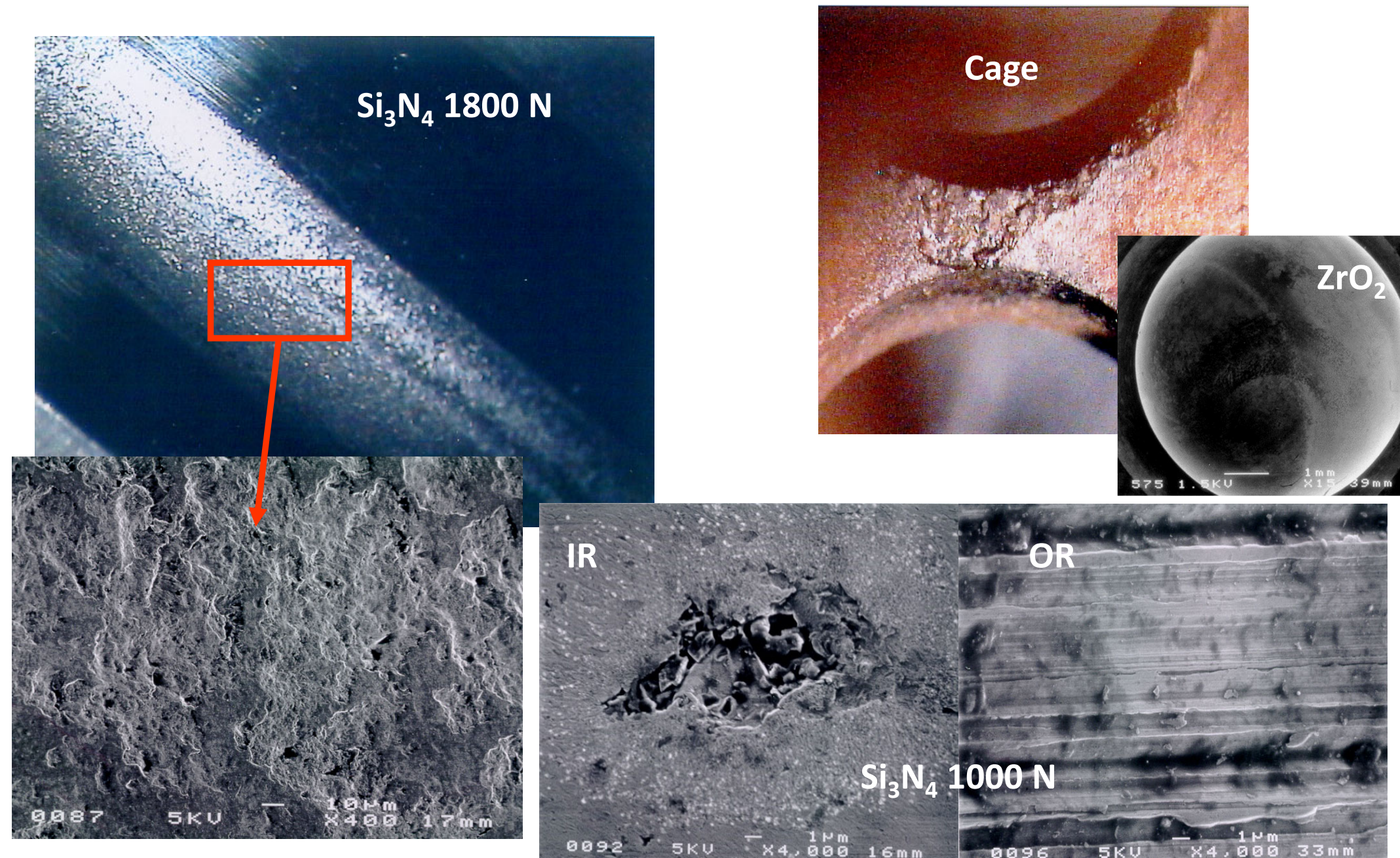
Normalisation internationale des roulements (ISO 492, 199, 578, 1224)



- Normalisation des classes de tolérance et du jeu interne
 - Tolérances: 0-6-5-4-2 (- serrées au + serrées)
 - Jeux radial interne: C1 – C2 – CN – C3 – C4 – C5 (du + petit au + grand)
- ABEC: standard de tolérances US

| ABEC | ISO 492 | DIN 620 | JIS B1514 |
|--------|--------------------|---------|-----------|
| ABEC 1 | normal class 6X | P0 | Class 0 |
| ABEC 3 | class 6 | P6 | Class 6 |
| ABEC 5 | class 5 | P5 | Class 5 |
| ABEC 7 | class 4 | P4 | Class 4 |
| ABEC 9 | class 2 | P2 | Class 2 |

Endommagement des roulements



Problématique et principes généraux

- Choix
 - Du roulement
 - Des ajustements
 - Fixation latérale des bagues de roulement
 - Etanchéité
 - Lubrification
- Principes de conceptions
 - Conception simple avec peu de pièces
 - Pièces normalisées et disponibles
 - Peu de pièces « spéciales » à fabriquer
 - Prendre en compte le montage (possibilité, facilité, ordre)

Choix des ajustements: règles générales

1. Règle

Chaque roulement d'un même montage a

- Une bague ajustée serrée
- Une bague ajustée avec jeu

Le jeu:

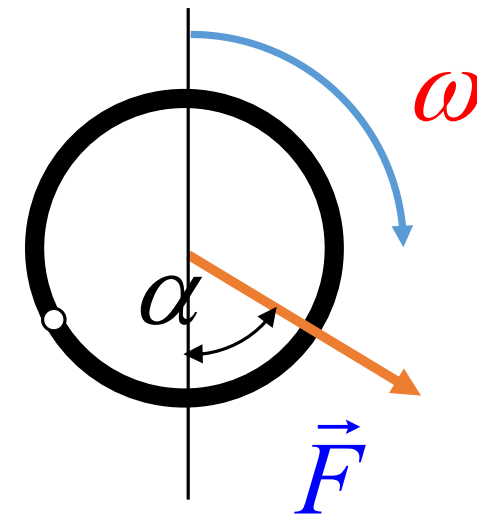
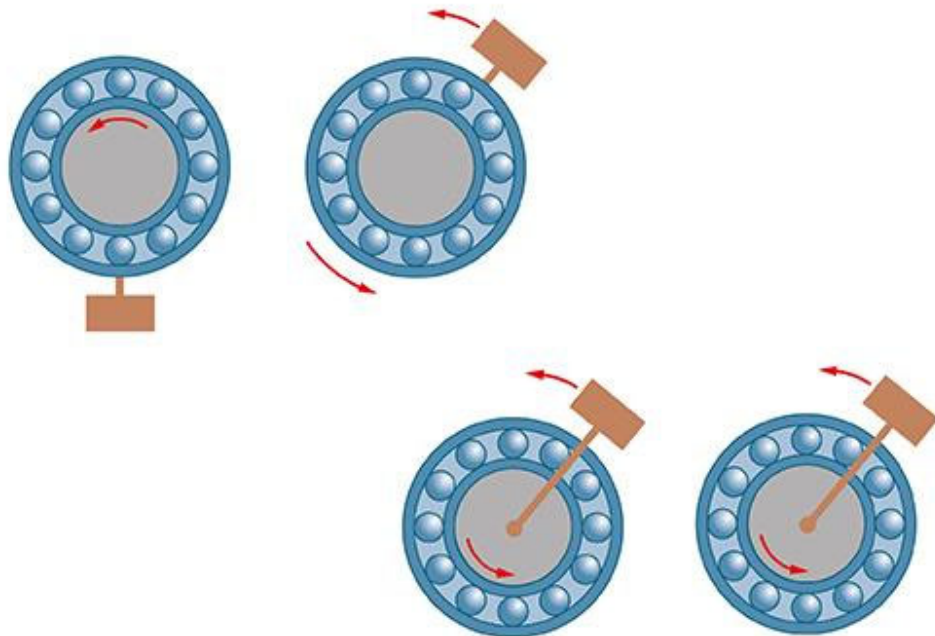
- Simplifie les assemblages
- Compense les dilatations
- Evite les « oppositions mutuelles entre roulements » (blocage)

Choix des ajustements: règles générales

2. Règle:

Si une bague tourne par rapport à la direction de la charge appliquée au roulement, elle doit être ajustée avec serrage.

Si elle est fixe ou ne tourne pas par rapport à la direction de la charge, elle doit être ajustée avec jeu.



Effet d'un mauvais ajustement: corrosion de contact (fretting corrosion)



← Jeu excessif

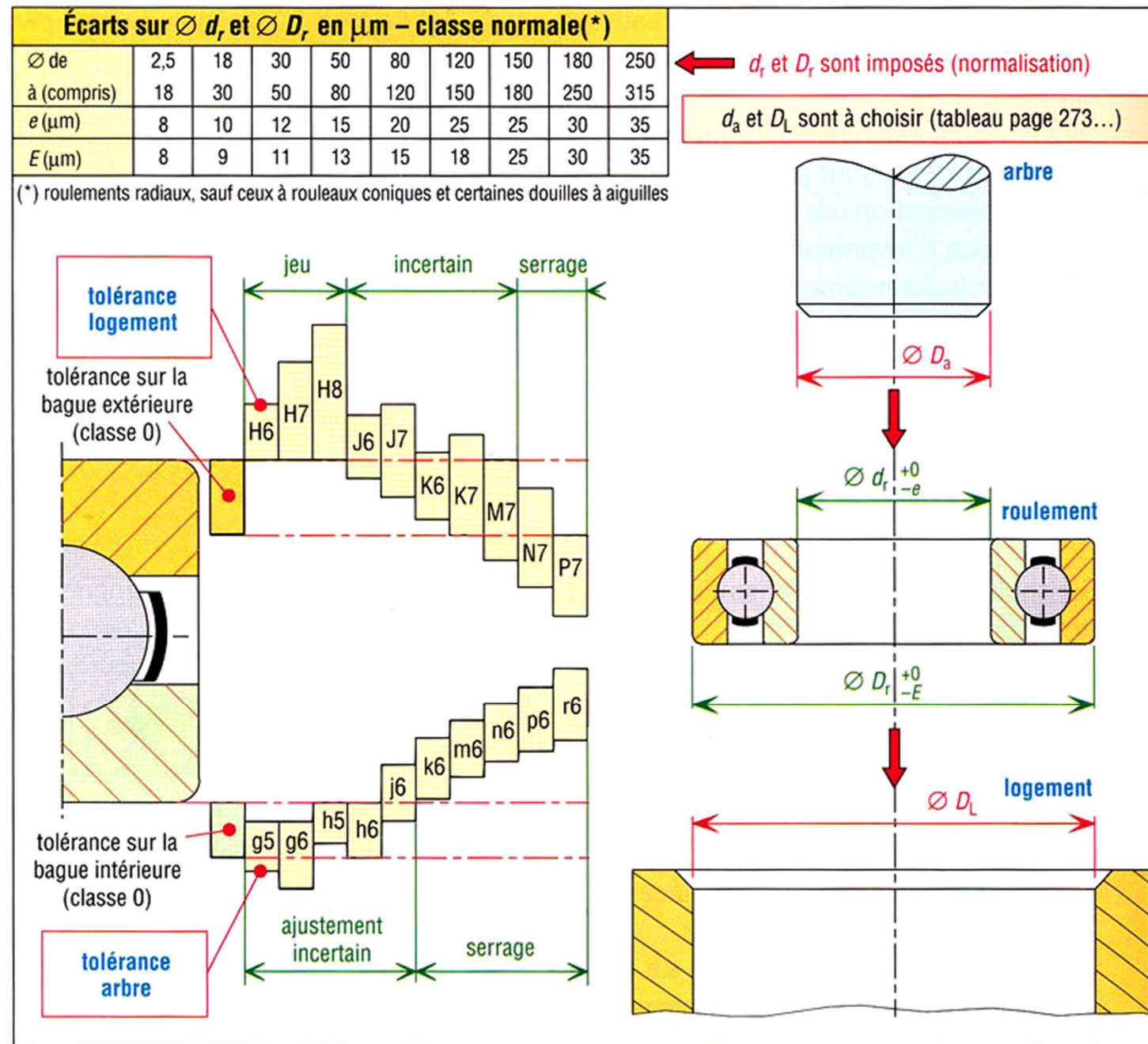
Montage ~ correct



Jeu excessif



Choix des ajustements: normalisation



- Normalisation dimension roulements par les fabricants:

d_r = diamètre intérieur

D_r = diamètre extérieur normalisés par fabricants

- Seuls choix des tolérances, par le concepteur:

d_a = diamètre arbre

D_L = diamètre logement

- Pour classe 6, tolérances normales les plus courantes

Ajustements usuels des roulements

| Ajustements usuels des roulements (fabricants) | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|-------------------------------|---------------------|--|---------------|---------------|-------------------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|--|----------------|
| | particularités de la charge | | roulements à billes (tous) | | roulements à rotule sur rouleaux | | | | roulements à rouleaux coniques | | | roulements à aiguilles sans bague intérieure | |
| | | | | | d ≤ 40 | 40 < d ≤ 100 | 100 < d ≤ 140 | 140 < d ≤ 400 | | | | | |
| | | | d ≤ 100 | 100 < d ≤ 200 | roulements à rlx cylindr. + aiguilles avec b.i. | | | | d ≤ 120 | 120 < d ≤ 180 | 180 < d ≤ 400 | | |
| | | | | d ≤ 40 | 40 < d ≤ 140 | 140 < d ≤ 200 | 200 < d ≤ 400 | | | | | | |
| tolérance des arbres | charge tournante par rapport à la bague intérieure | faible $\frac{C}{P} > 10$ | j6 | k6 | j6 | k6 | m6 | | m6 | n6 | n6 | h5 (h6) si d ≤ 80 g5 (d > 80) | |
| | | normale $5 < \frac{C}{P} \leq 10$ | k6 (k5) | m6 (m5) | k6 (k5) | m6 (m5) | n6 | p6 | m6 | n6 | p6 | | |
| | | forte $\frac{C}{P} \leq 5$ | k6 | m6 d > 200 n6 | – | n6 | p6 | r6 | n6 | p6 | r6 | | |
| | charge fixe par rapport à la bague intérieure | | g6 (BC) h6 (BNC) | | g6 (BC) h6 (bague intérieure non coulissante) | | | | g6 (BC) h6 (BNC) | | | g5 | |
| tolérance des logements | charge tournante par rapport à la bague extérieure | faible $\frac{C}{P} > 10$ | M7 | | M7 | | | | P7 ou R7 (forte charge) | | | M7 | N7 douilles |
| | | normale $5 < \frac{C}{P} \leq 10$ | N7 | | N7 | | | | | | | N7 | |
| | | forte $\frac{C}{P} \leq 5$ | P7 | | P7 | | | | | | | P7 | |
| | charge fixe par rapport à la bague extérieure | | H7 (BC) K6 (PR) G7 (EA) | | H7 (bague coulissante) K6 (PR) G7 (EA) | | | | bague ext. réglable | J7 | H7 (bague coulissante) ou J7 | | |
| | | | | | | | | bague ext. non réglable | P7 (R7) | | | | |

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

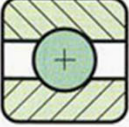
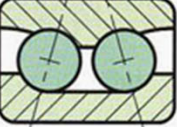
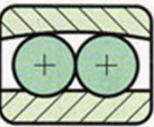
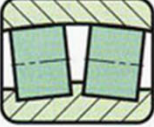
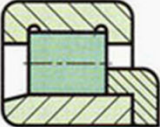

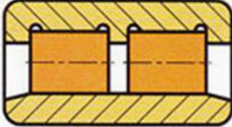

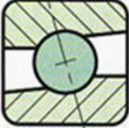
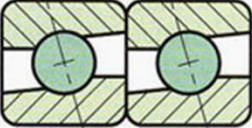

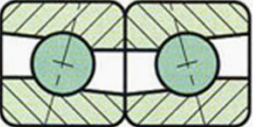
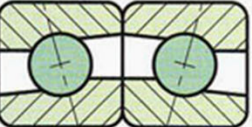
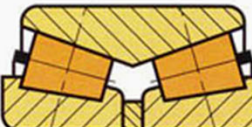
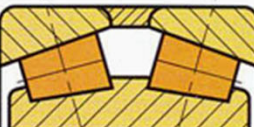
Ajustements usuels des roulements

- Les ajustements ont toujours une justification fonctionnelle
- Le choix de l'ajustement dépend:
 - Du mouvement relatif bague – charge
 - Du niveau de charge C/P
 - C = charge dynamique de base
 - P = charge équivalente exercée sur le roulement
 - Du type de roulement
 - De la taille du roulement
 - Du régime thermique
 - De la précision de rotation désirée

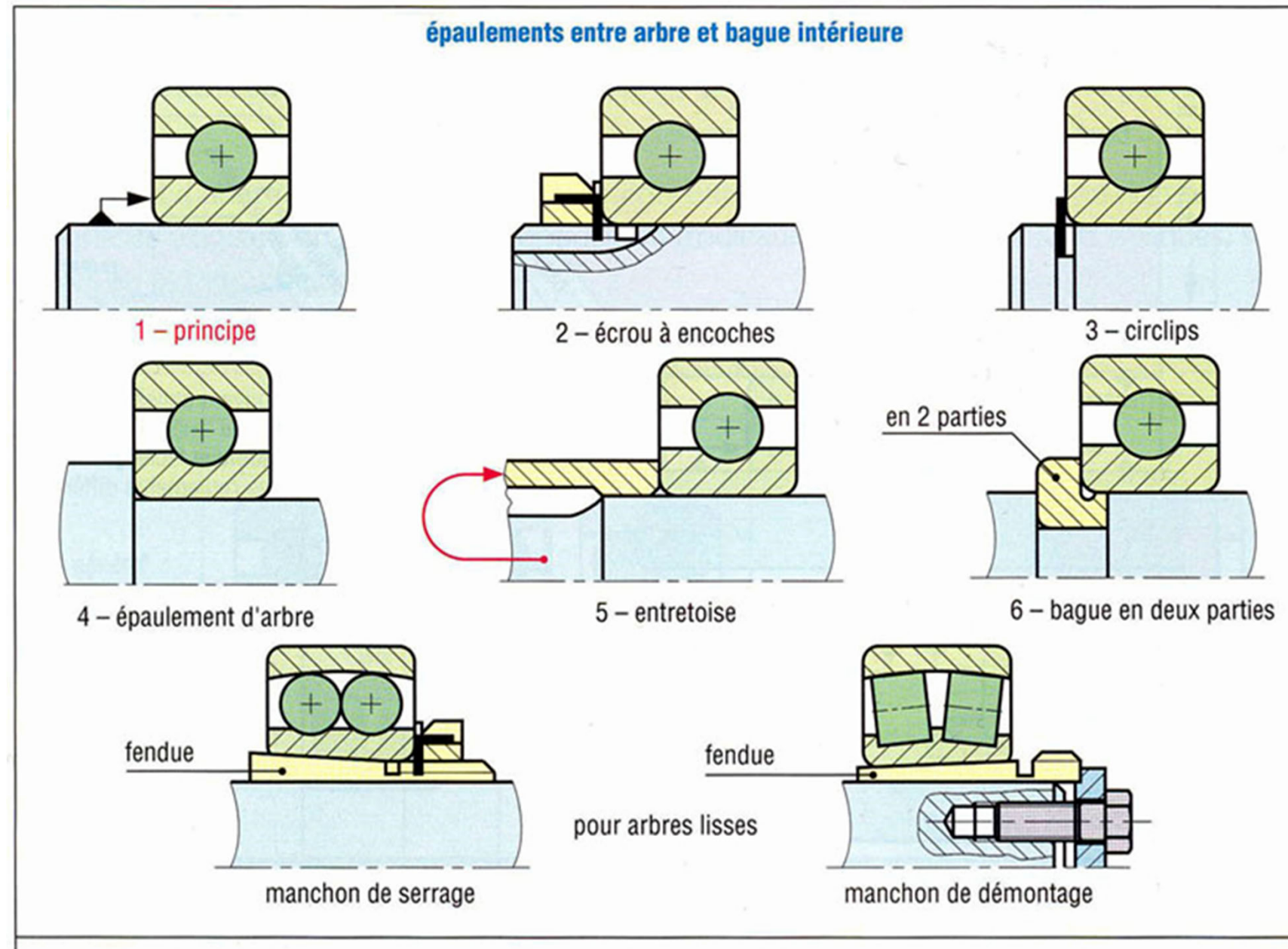
Ajustements usuels des butées

| Ajustements : cas des butées ou roulements axiaux | | | | |
|---|--|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | tolérance des arbres | | tolérance des logements | |
| particularités de la charge | butées à billes et à rouleaux cylindriques | à rotule sur rouleaux | à billes et à rouleaux cylindriques | à rotule sur rouleaux |
| axiale pure (centrée) | h6 | h6 | H8 (billes) H7 (rouleaux) | E8 G7 (charge forte) |
| charge fixe sur rondelle arbre (tourne % logement) | | j6 | | K7 (usuel) M7 (forte charge) |
| charge tournante sur rondelle arbre ou indéterminée | | k6 | $d \leq 200$ | |
| | | m6 | $200 < d \leq 400$ | |
| | | n6 | $d > 400$ | |

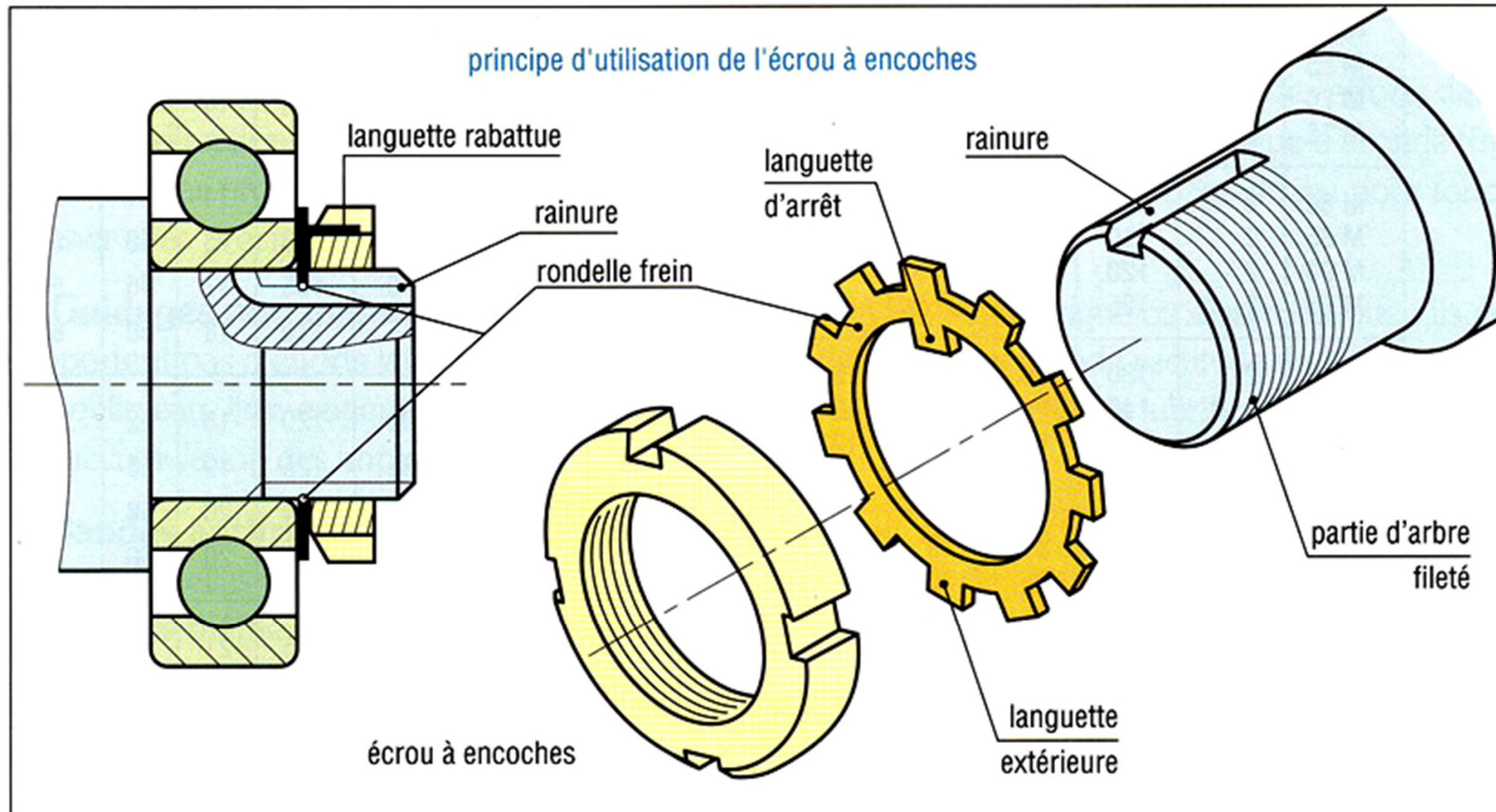
Fixation latérale des bagues de roulements

| Règles de montage | | |
|---|---|--|
| règles | roulements à bagues non séparables | roulements à bagues séparables |
| cas général (pages 274 à 279) | <div>BGP</div>  <div>DCO</div>  <div>RB</div>  <div>RR</div>  <div>CYE</div>  | <div>CY</div>  <div>CYD</div>  <div>A</div>  <div>(règles pages 282 et 283)</div> |
| cas exigeant un montage en opposition (pages 280 à 282) | <div>CO</div>  <div>COT</div>  <div>en tandem (T)</div> | <div>C</div>  |
| groupements particuliers (combinaison des deux cas précédents) | <div>COO</div>  <div>duplex en O</div> <div>COX</div>  <div>duplex en X</div> <div>O</div> <div>X</div> | <div>CDO</div>  <div>CDX</div>  |

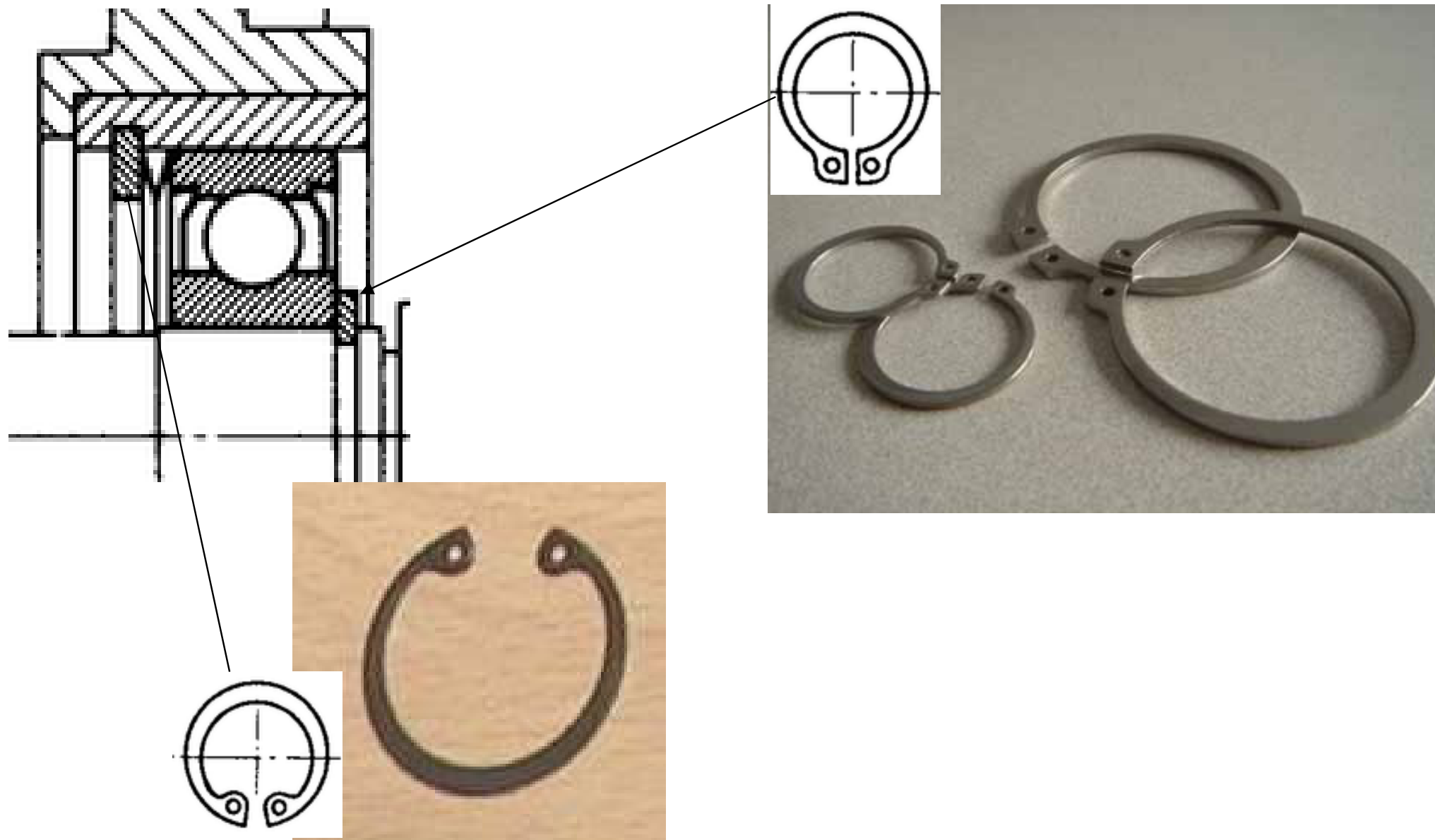
Fixation latérale des bagues de roulements



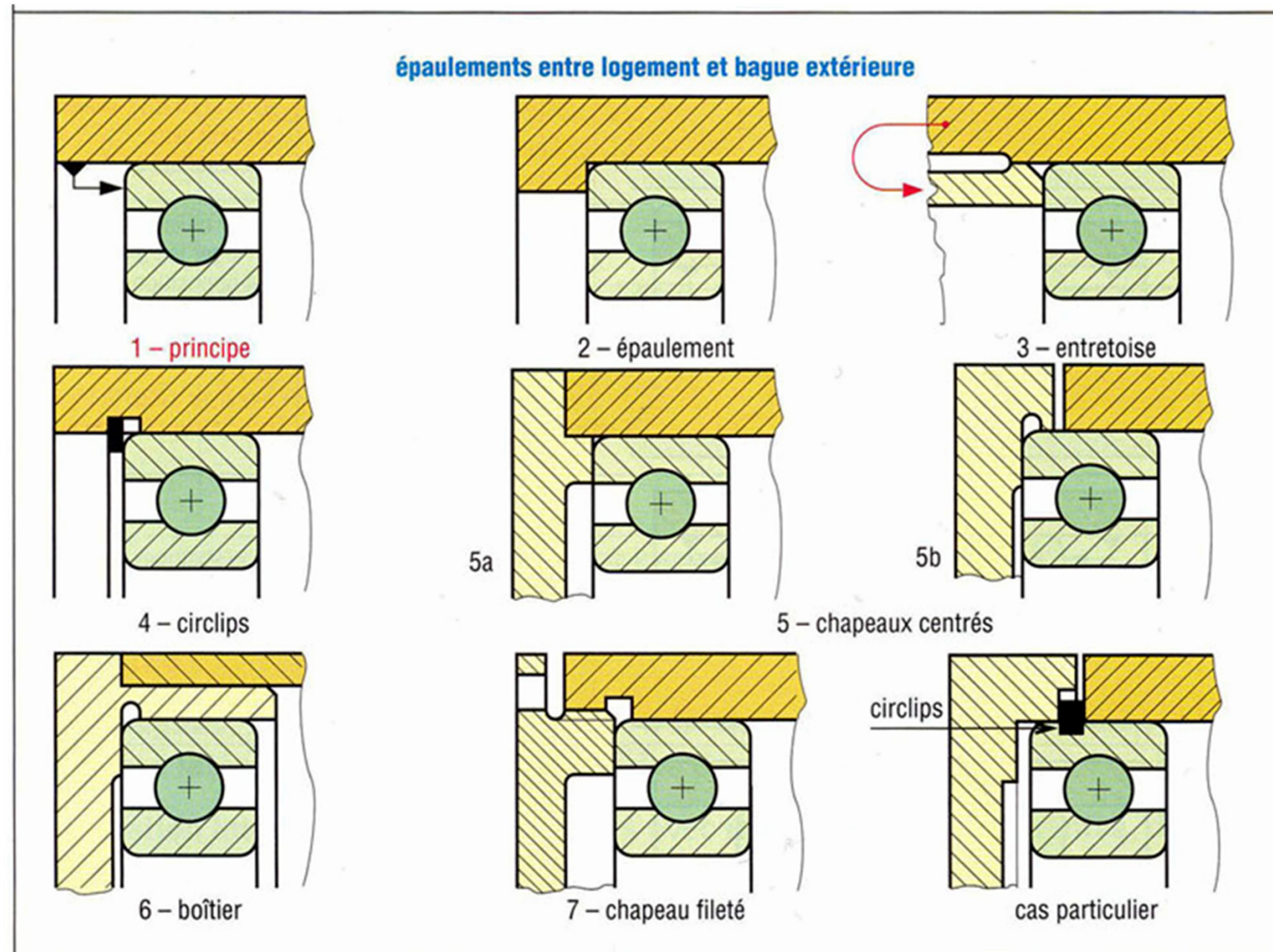
Fixation latérale des bagues de roulements: Montage avec écrou à encoches



Fixation latérale des bagues de roulements:
Circlips



Fixation latérale des bagues de roulements



Fixation latérale des bagues de roulements

1. Règle (exceptions possibles)

Les bagues tournantes par rapport à la charge et ajustées serrées, doivent être fixées latéralement (épaulées) des deux cotés

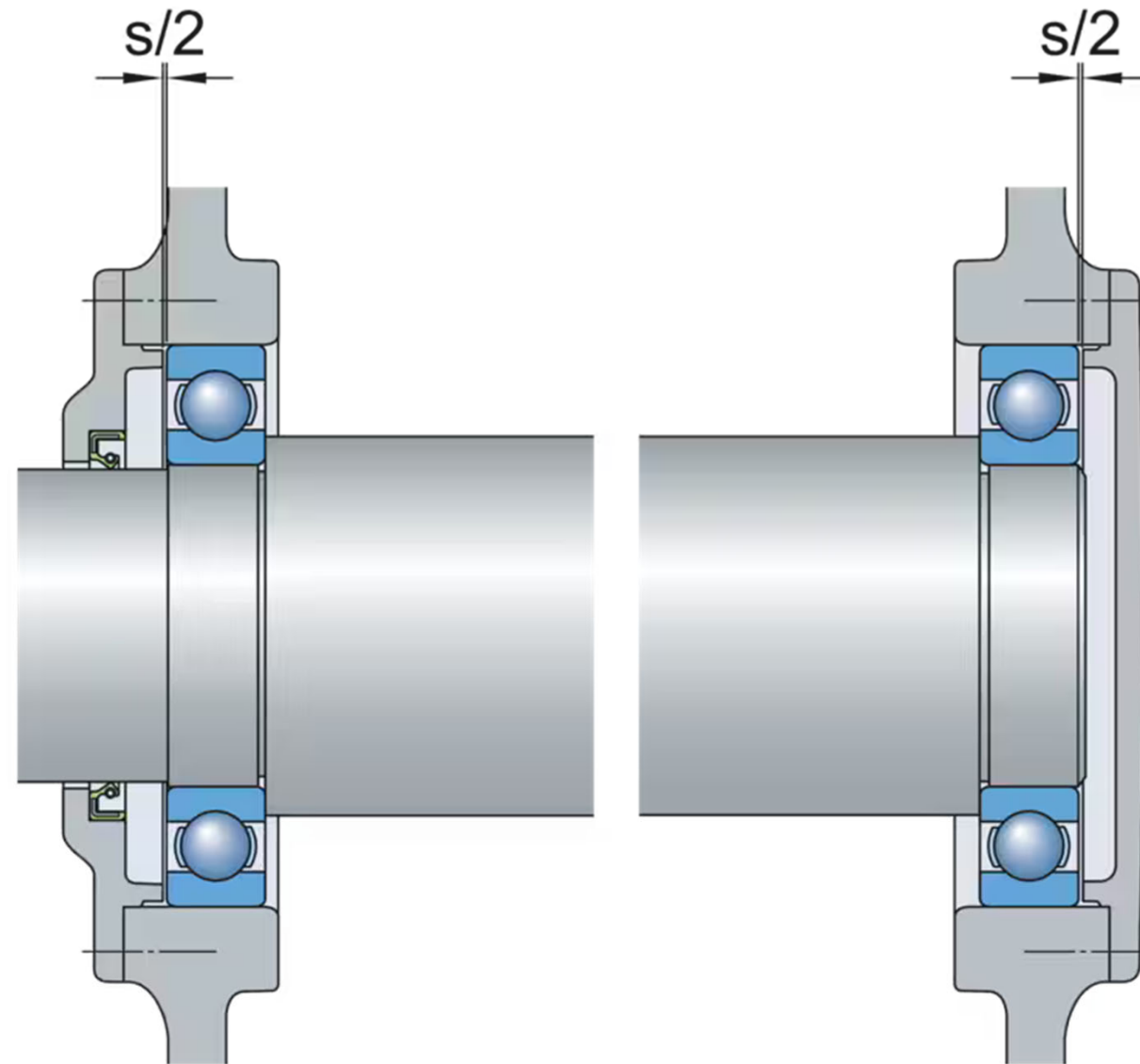
2. Règle

La fixation latérale des bagues ajustées avec jeu ou montées glissantes doit tenir compte des points suivants

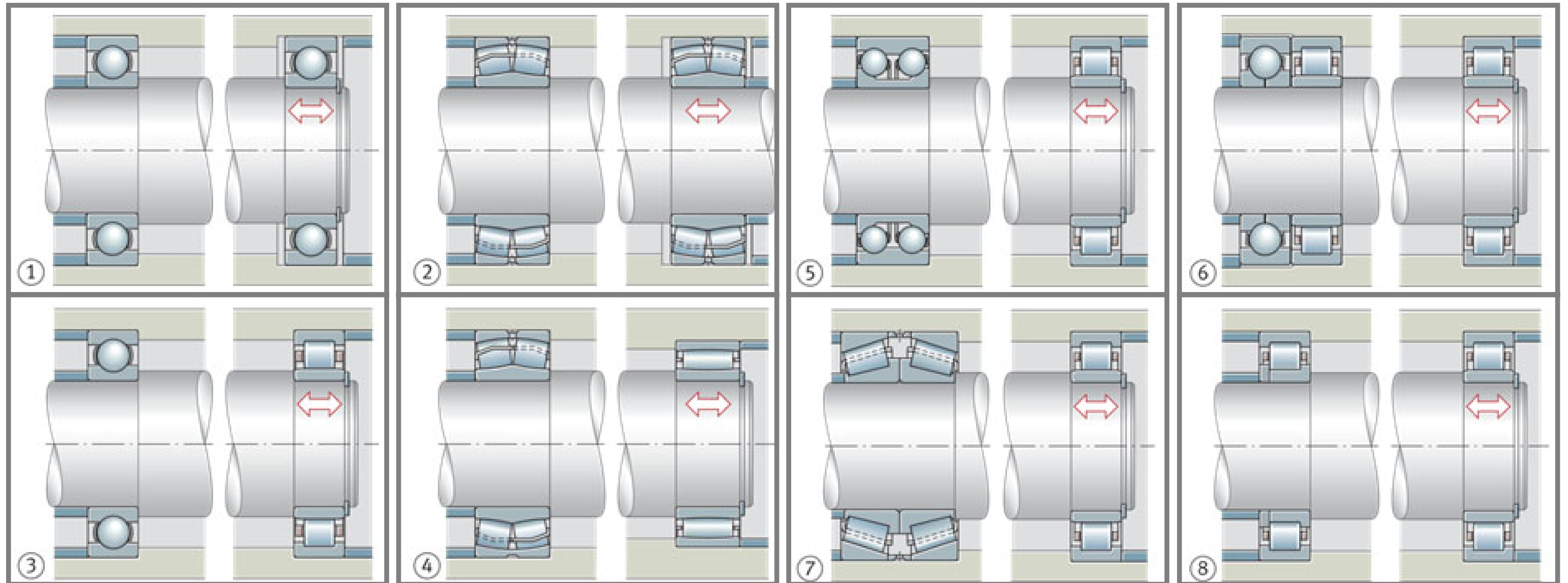
- Eliminer la translation de l'arbre par rapport au logement
- Eviter les oppositions mutuelles des roulements (hyperstatismes donnent détériorations rapide)
- Eliminer les mouvements internes parasites
- Supporter au mieux les charges axiales

Fixation latérale des bagues de roulements

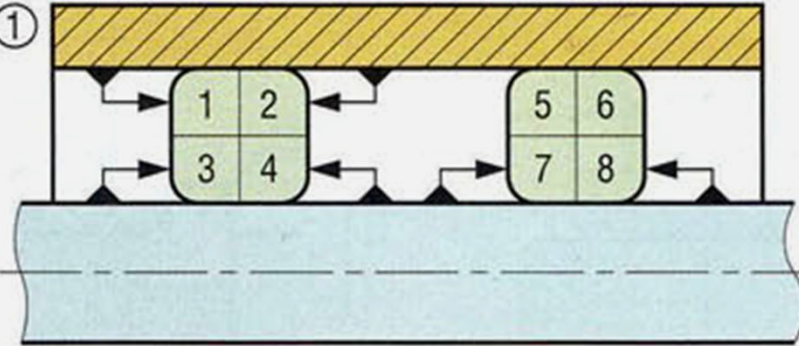
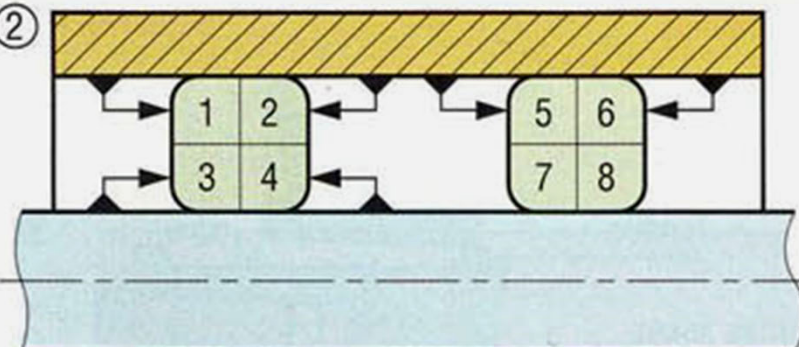
Montage flottant usuel pour des roulements à billes à contact radial.



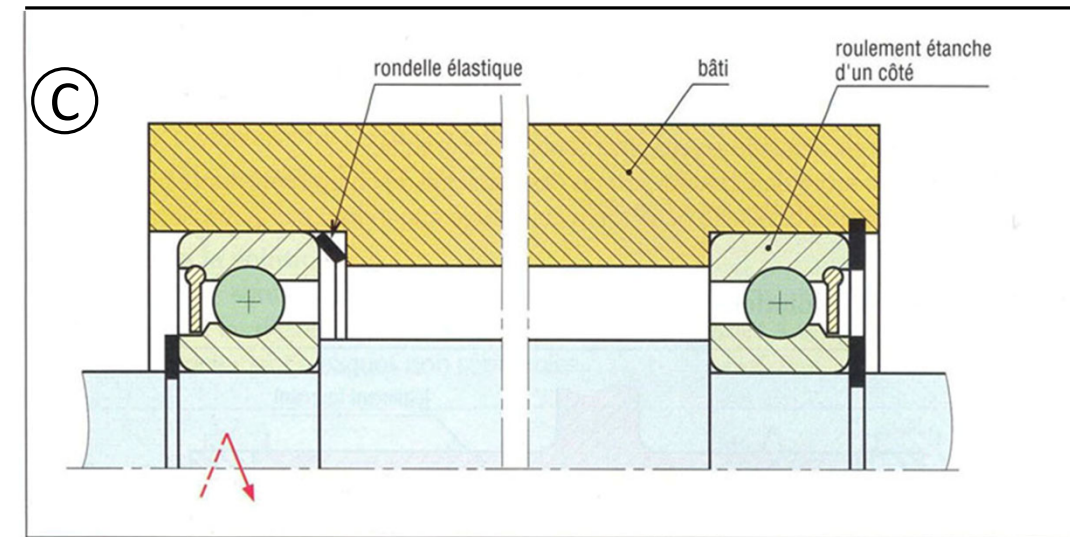
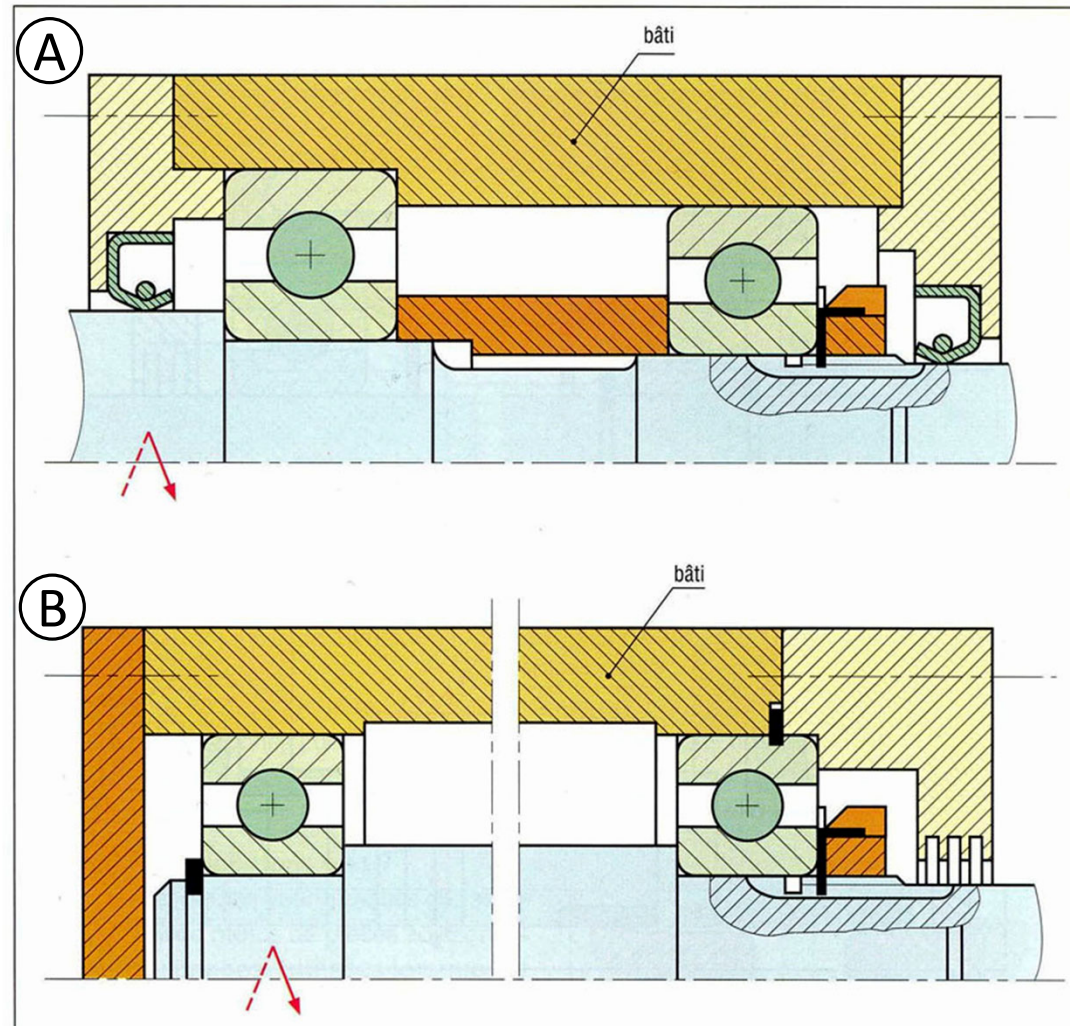
Fixation latérale des bagues de roulements



Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 1 et 2

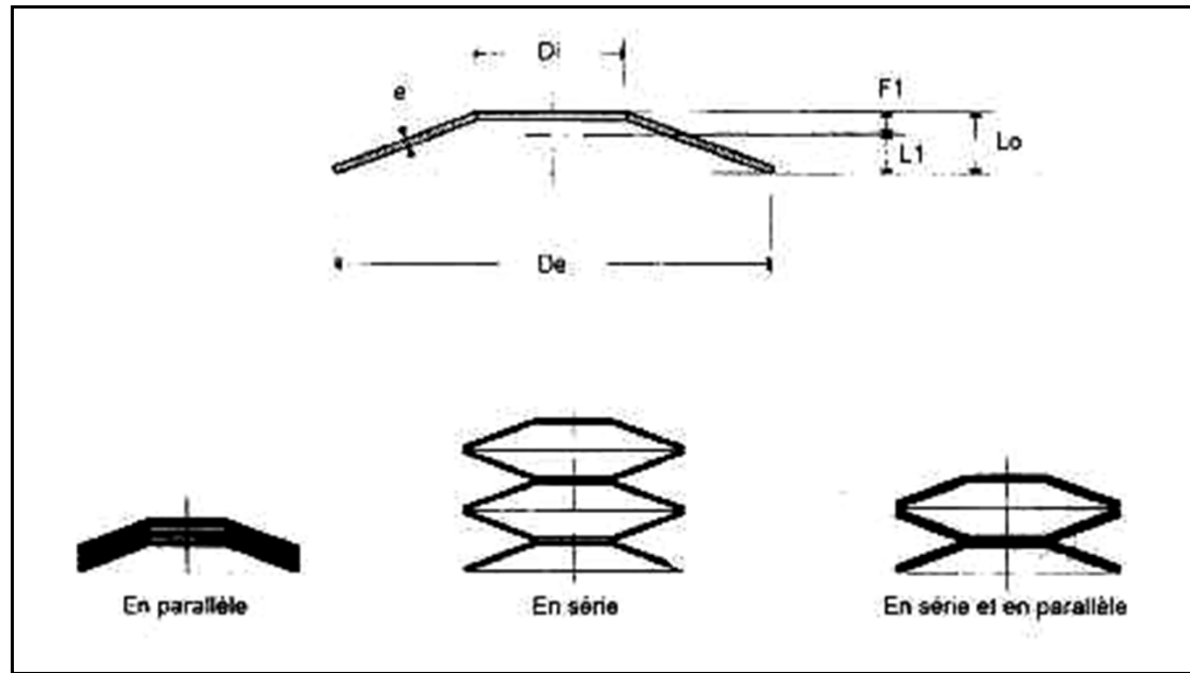
| solutions N° ↓ | Combinaisons usuelles des épaulements (cas général) | exemples : BGP + BGP BGP + DCO RB + RB , COO + COO | | | |
|-------------------|--|--|-----------------------------------|--|--|
| | | bague intérieure tournante/charge | bague extérieure tournante/charge | cas de 2 roulements à bagues non séparables | cas où l'un des 2 roulements est à bagues séparables |
| | | | | | exemples : BGP + CY DCO + CY COO + CY |
| | | | | | remarques |
| ① |  | ● | ● | | souvent utilisé, n'exige pas un jeu axial de fonctionnement, montage facile avec des roulements différents |
| ② |  | | ● | ● | idem ci-dessus mais moins utilisé |

Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 1 - Exemples

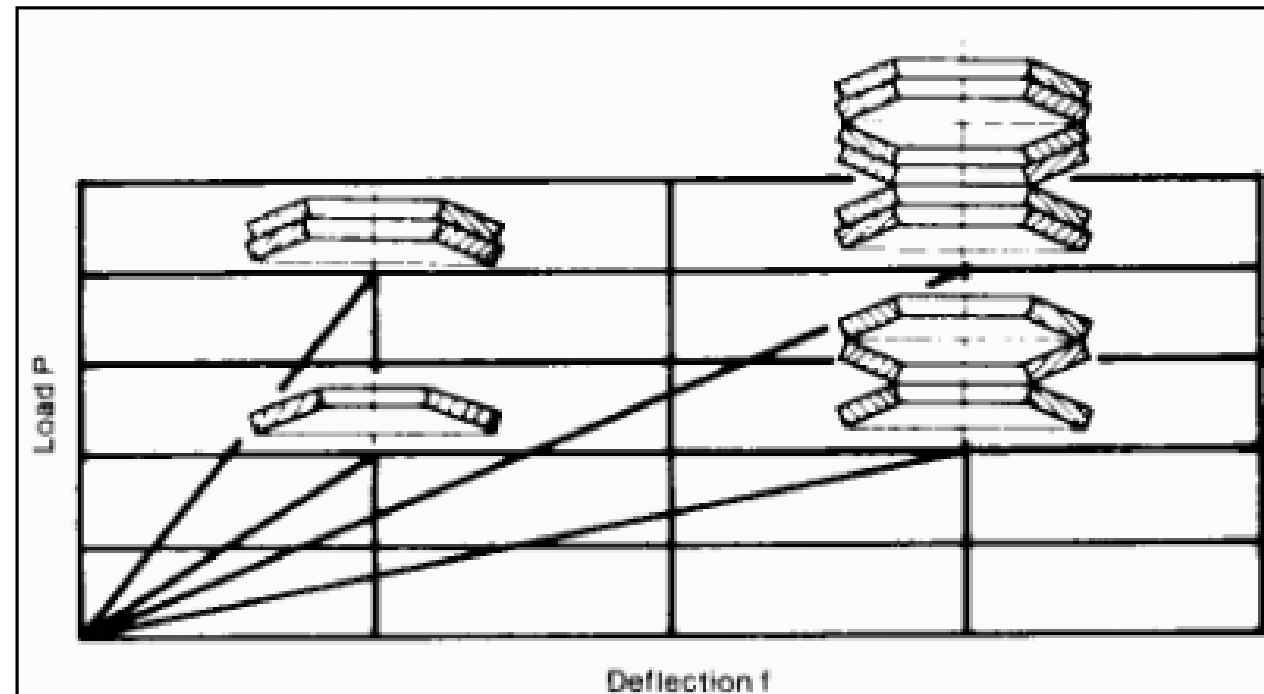


- *Arbre tournant, charge fixe par rapport au bâti.*
- ***Bagues intérieures serrées***
- ***Bagues extérieures glissantes***
- *Efforts axiaux sur 1 roulement*
- *A et B: prémontage sur l'arbre possible*

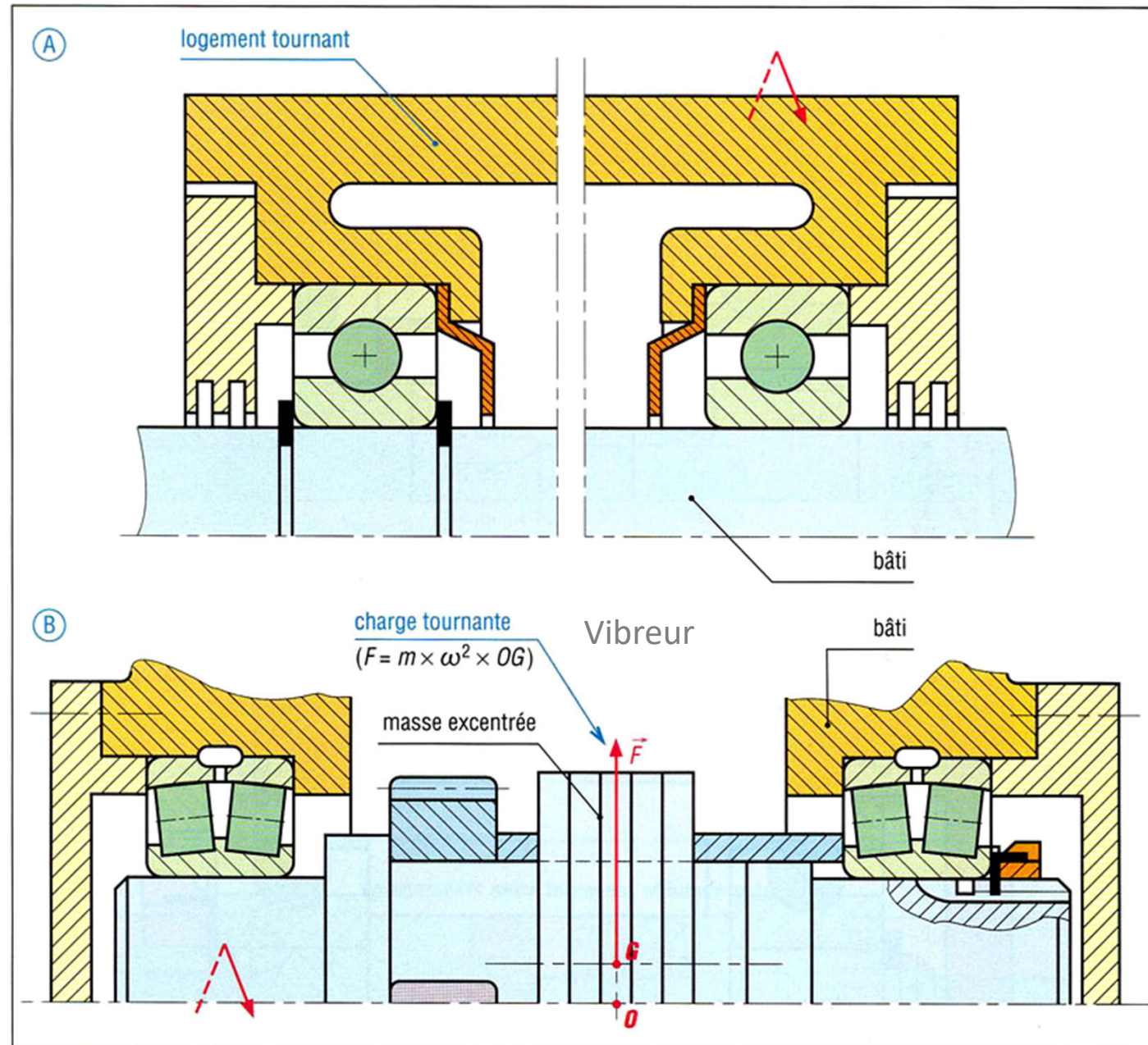
Fixation latérale des bagues de roulements: Rondelles élastiques cuvettes, Belleville ou Schnorr



D_i = Diamètre intérieur [mm]
 D_e = Diamètre extérieur [mm]
 L_0 = Hauteur libre approximative [mm]
 L_1 = Hauteur sous charge P_1 [mm]
 P_1 = Charge à L_1 [N]
 F_1 = Flèche sous charge P_1 , (déflexion) = $L_0 - L_1$ [mm]
 e = Épaisseur [mm]

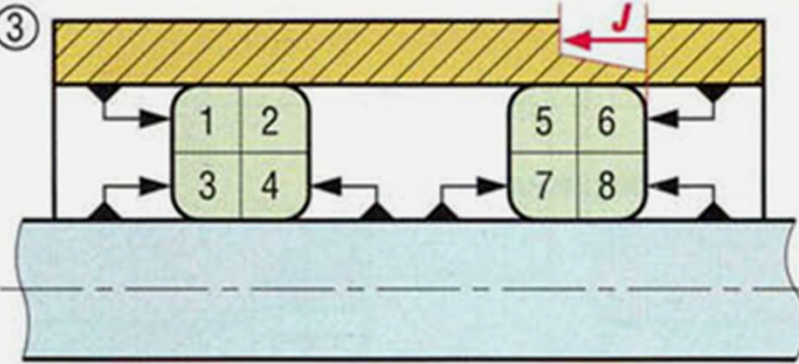
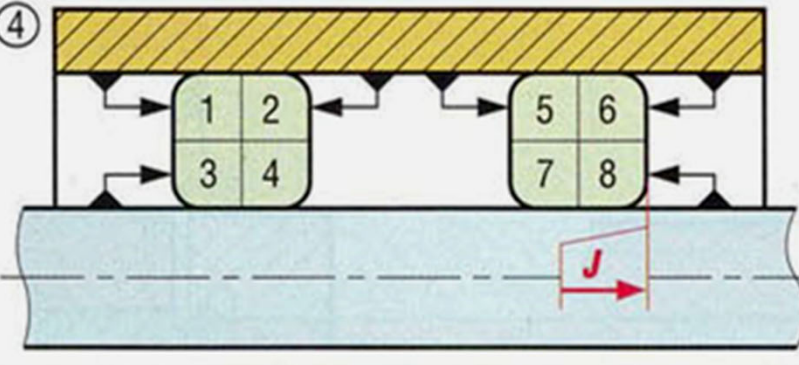


Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 2 - Exemples

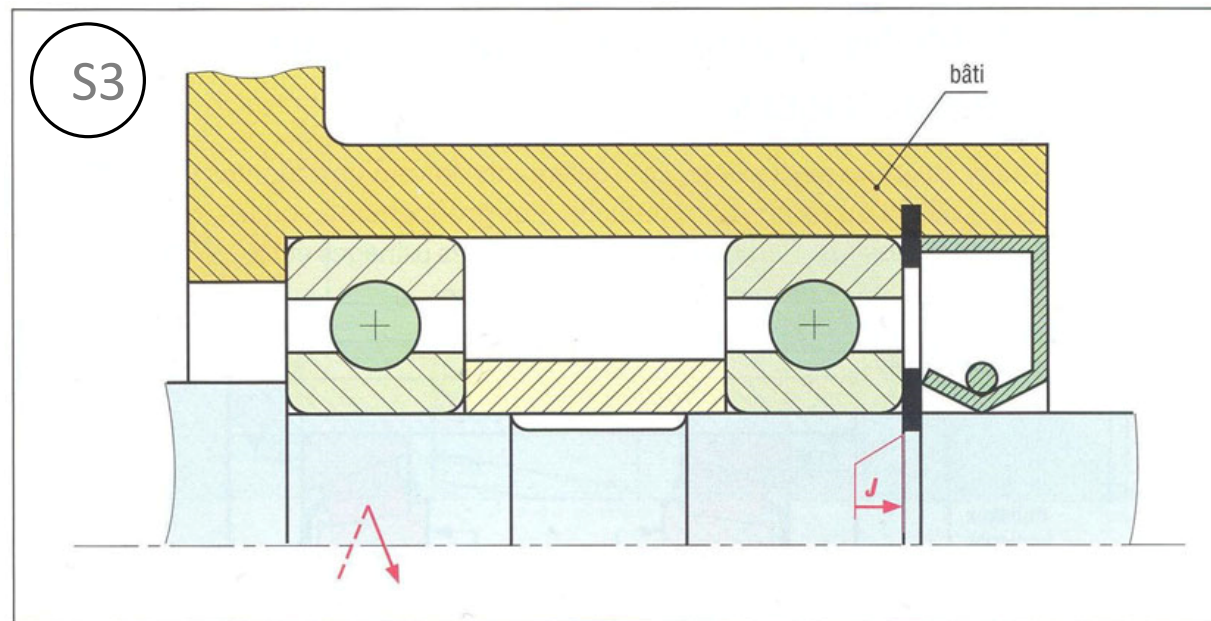


- Logement tournant, charge fixe par rapport à l'arbre
- *Bagues intérieures glissantes*
- *Bagues extérieures serrées*
- Charge centrifuge tournante par rapport au logement

Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 3 et 4

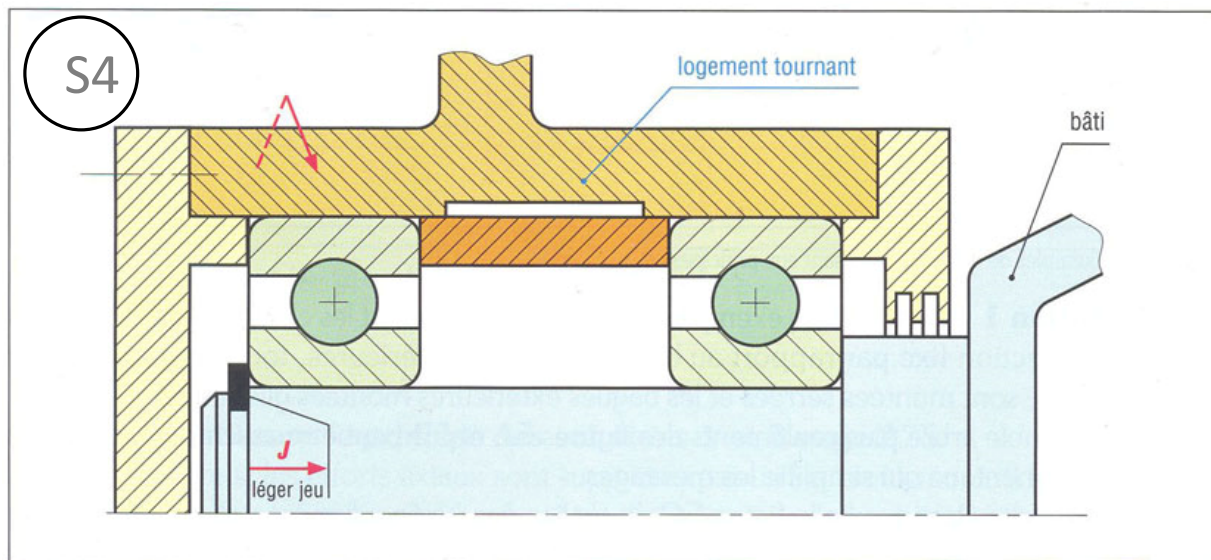
| solutions N° ↓ | Combinaisons usuelles des épaulements (cas général) | | | | | exemples : BGP + BGP BGP + DCO RB + RB , COO + COO |
|-------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|--|---|
| | | bague intérieure tournante/charge | bague extérieure tournante/charge | cas de 2 roulements à bagues non séparables | cas où l'un des 2 roulements est à bagues séparables | exemples : BGP + CY DCO + CY COO + CY |
| | | | | | | remarques |
| ③ |  | ● | ● | | | <p>solution 3 : les épaulements 1 et 6 peuvent être remplacés par des épaulements sur 2 et 5</p> <p>avec la charge axiale dans un seul sens, les résultats sont meilleurs</p> |
| ④ |  | | ● | ● | | <p>assez utilisés, exigent un léger jeu J pour éviter les oppositions mutuelles et compenser les dilatations ou une rondelle élastique</p> <p>à utiliser avec des liaisons courtes</p> |

Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 3 et 4 - Exemples



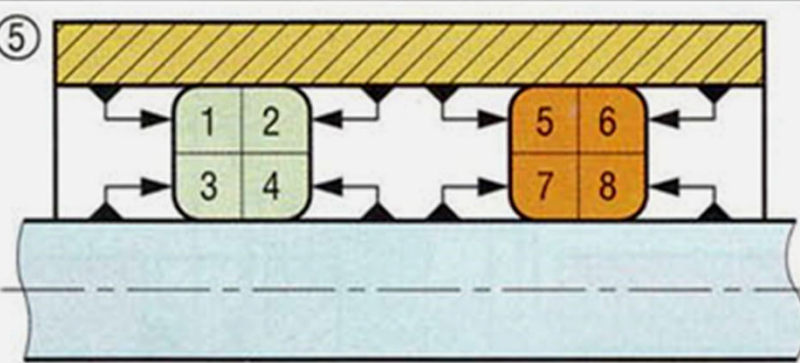
- *Bagues intérieures serrées*
- *Bagues extérieures glissantes*

- J Jeu axial fonctionnel pour reprendre les dilatations
- Distance entre paliers courte limite ces dilatations

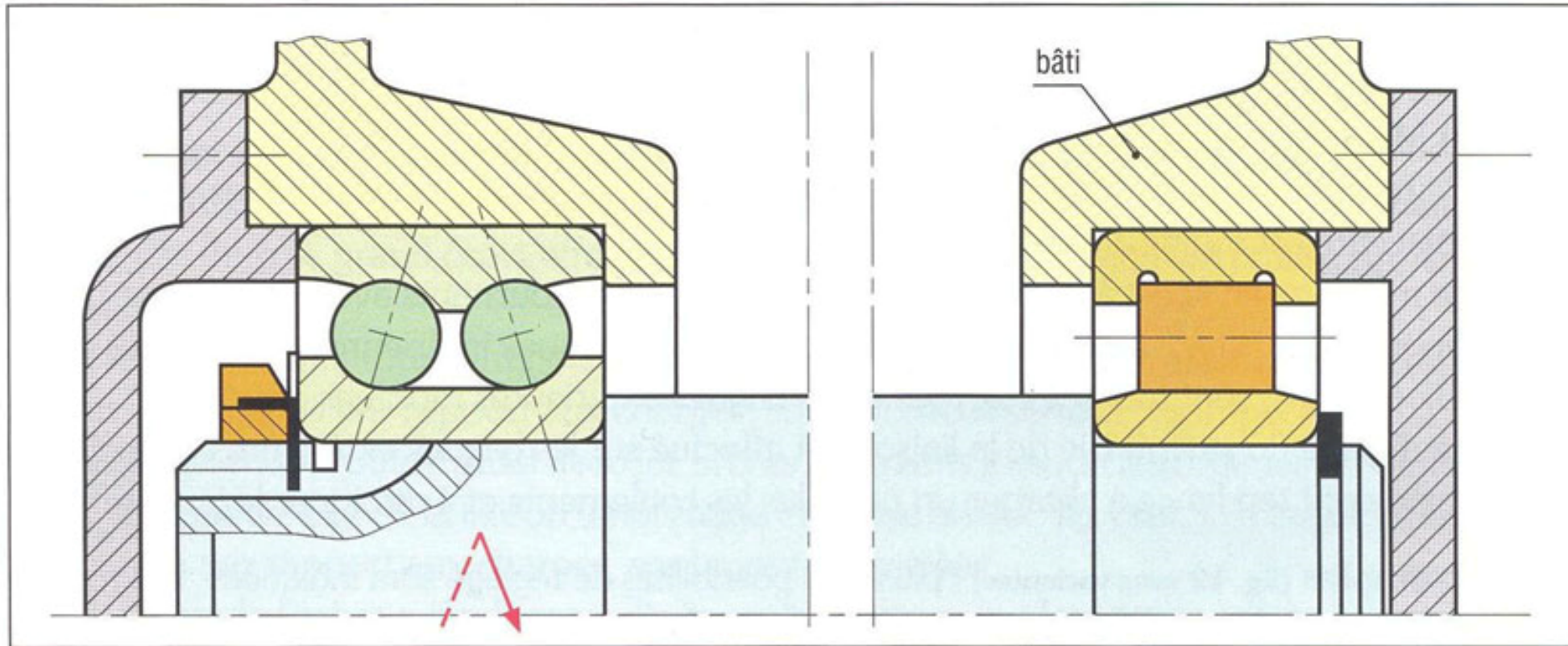


- *Bagues intérieures glissantes*
- *Bagues extérieures serrées*

Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solution 5

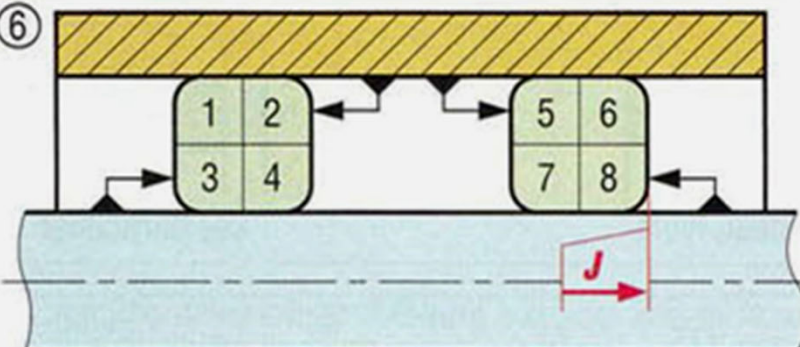
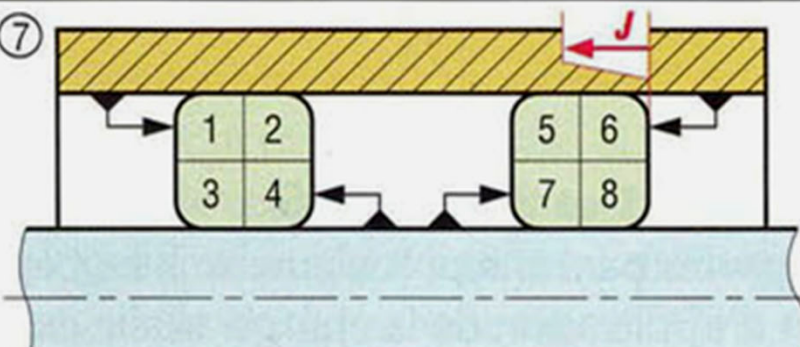
| solutions N° ↓ | Combinaisons usuelles des épaulements (cas général) | bague intérieure tournante/charge | | | | exemples : BGP + BGP BGP + DCO RB + RB , COO + COO |
|-------------------|--|-----------------------------------|---|--|---|---|
| | | bague extérieure tournante/charge | | cas de 2 roulements à bagues non séparables | | exemples : BGP + CY DCO + CY COO + CY |
| | | | | | | remarques |
| ⑤ |  | ● | ● | | ● | liaisons rigides pouvant supporter charges élevées, chocs et vibrations |

Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 5 - Exemple

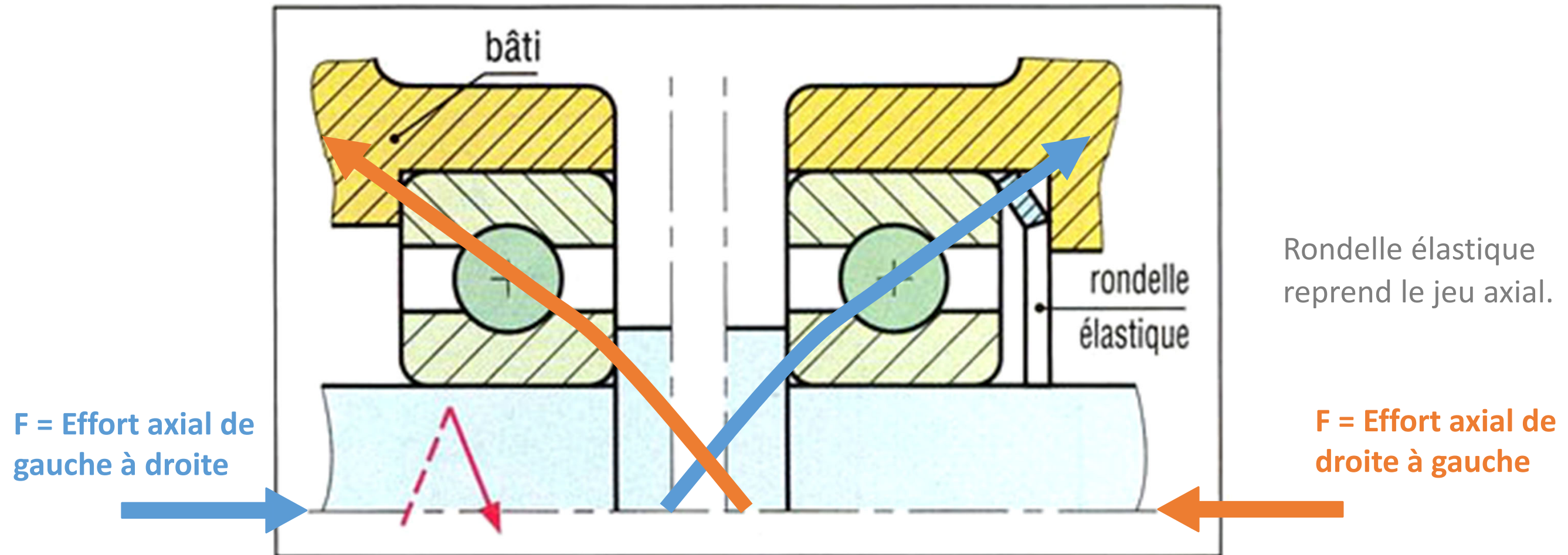


- *Un roulement séparable pour compenser les dilatations*

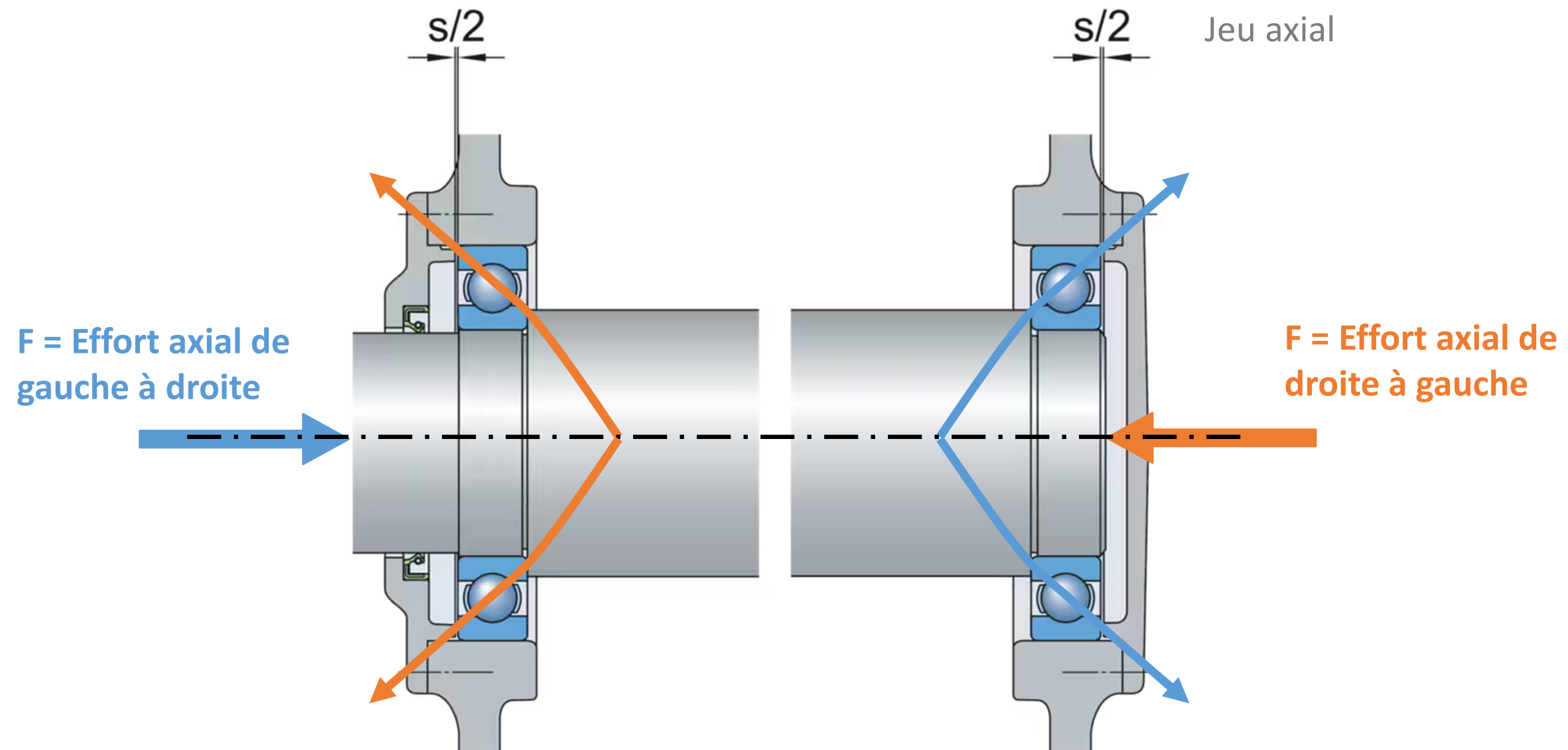
Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solution 6 et 7

| solutions N° ↓ | Combinaisons usuelles des épaulements (cas général) | exemples : BGP + BGP BGP + DCO RB + RB , COO + COO | | | |
|-------------------|--|--|-----------------------------------|--|---|
| | | bague intérieure tournante/charge | bague extérieure tournante/charge | cas de 2 roulements à bagues non séparables | cas où l'un des 2 roulements est à bagues séparables |
| | | | | | exemples : BGP + CY DCO + CY COO + CY |
| | | | | | remarques |
| ⑥ |  | | ● | ● | |
| ⑦ |  | ● | | ● | |
| | | | | | variante économique des cas 3 et 4 pour liaisons peu chargées (généralement sans charge axiale ou sous charge axiale faible selon type de roulements) |

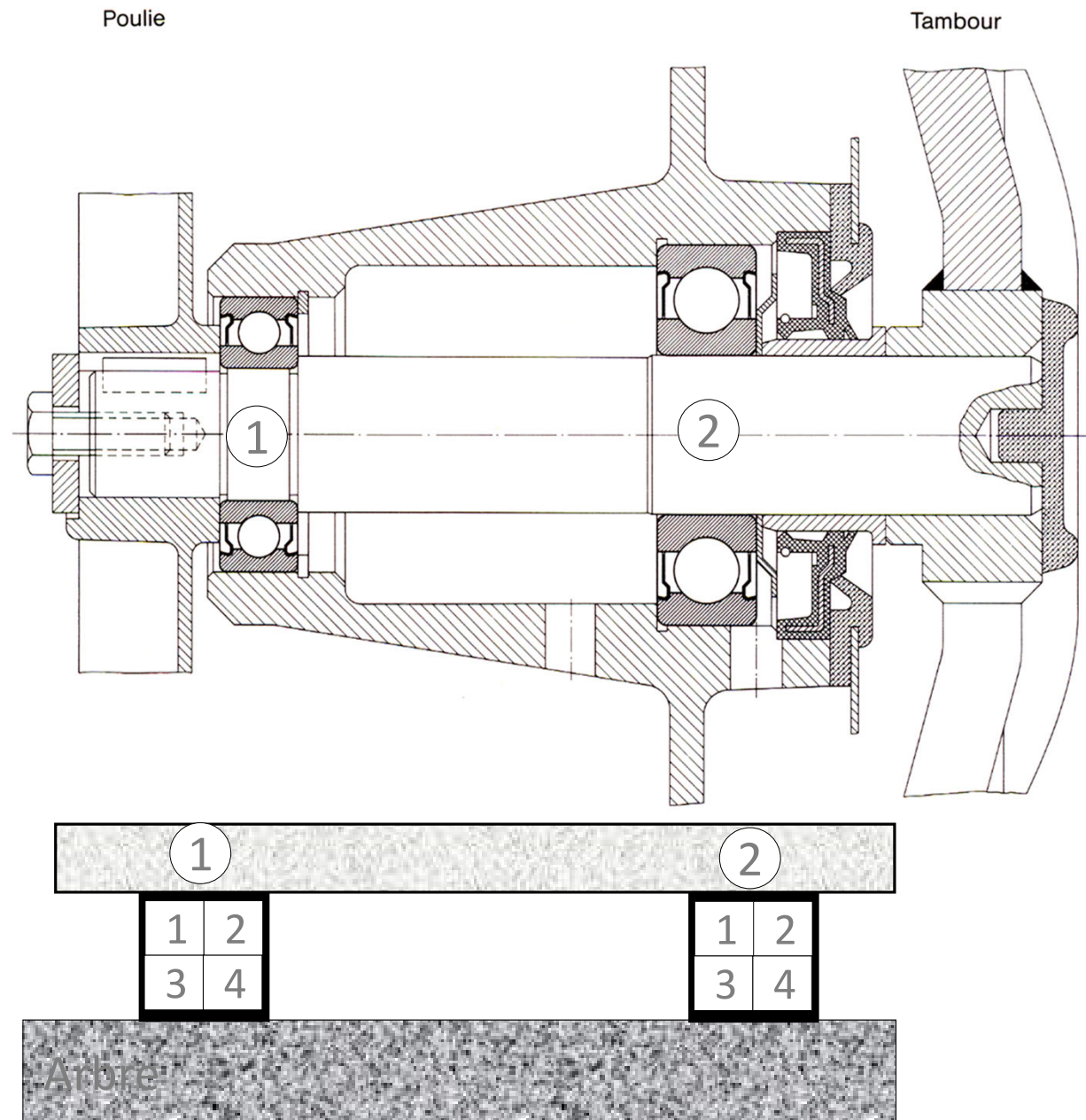
Fixation latérale des bagues de roulements: Combinaison des épaulements – Solutions 7 – Exemple



Fixation latérale des bagues de roulements:
Combinaison des épaulements – Solutions 7 – Exemple
Montage flottant usuel pour des roulements à billes à contact radial.



Fixation latérale des bagues de roulements:
Combinaison des épaulements – Exercice 1: Montage de roulements non démontables



La figure ci-contre représente le montage de l'arbre d'un tambour de machine à laver le linge.

1. Indiquer dans le schéma ci-dessous où se trouvent les épaulements
2. Indiquer le type des ajustements (serré ou avec jeu)

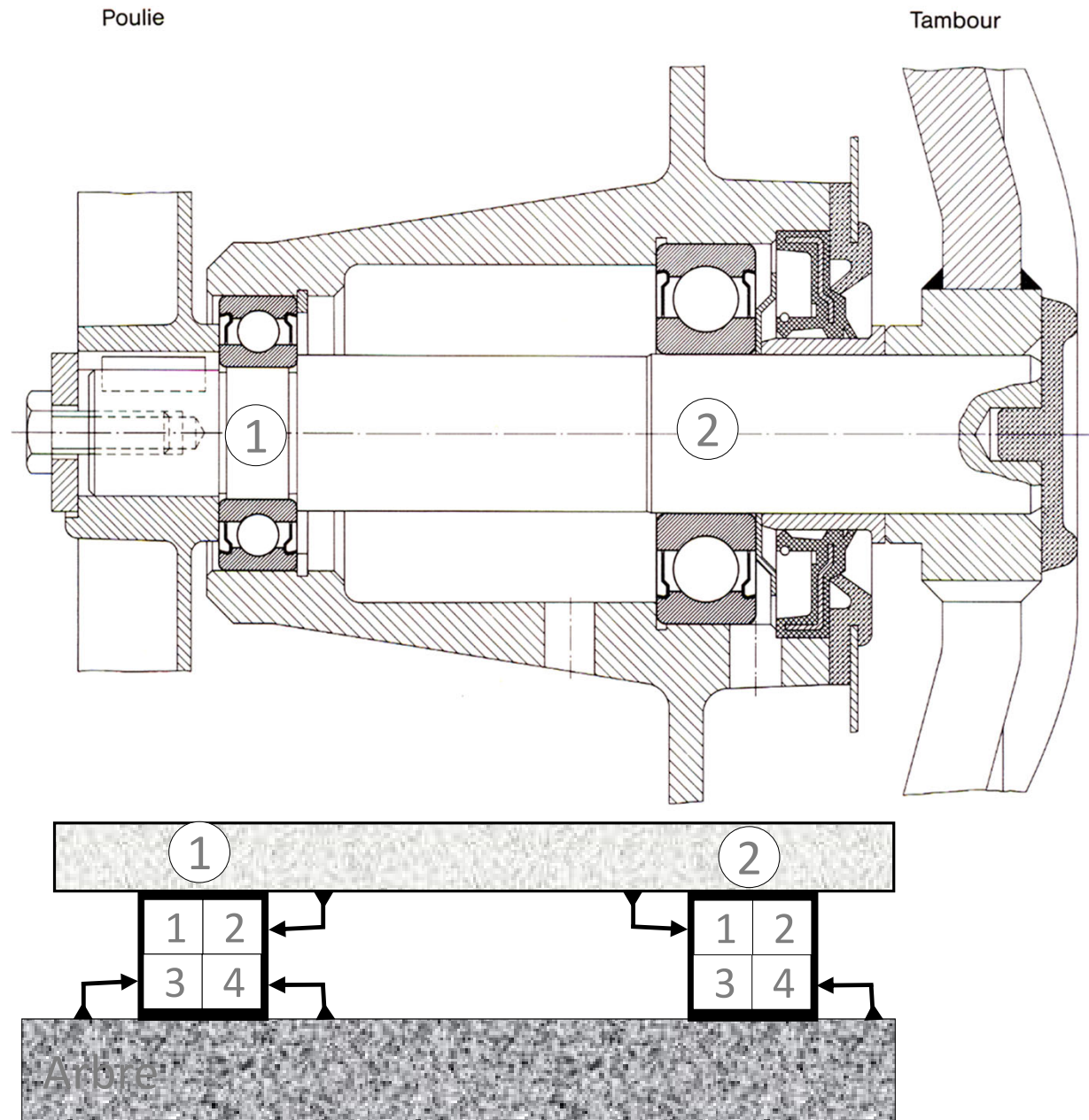
Palier 1 BI: _____

Palier 1 BE: _____

Palier 2 BI: _____

Palier 2 BE: _____

Fixation latérale des bagues de roulements:
Combinaison des épaulements – Exercice 1: Montage de roulements non démontables

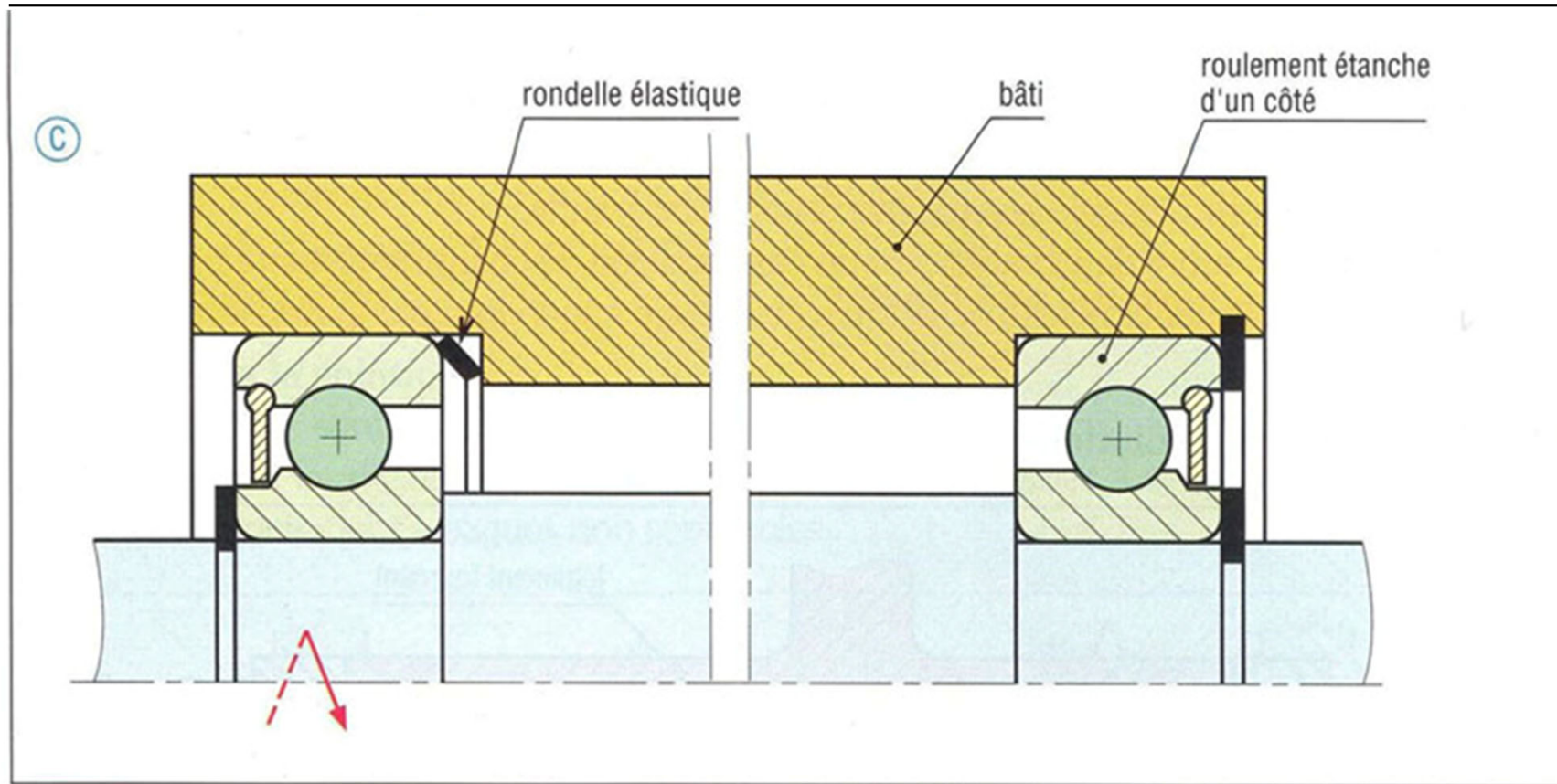


La figure ci-contre représente le montage de l'arbre d'un tambour de machine à laver le linge.

1. Indiquer dans le schéma ci-dessous où se trouvent les épaulements
2. Indiquer le type des ajustements (serré ou avec jeu)

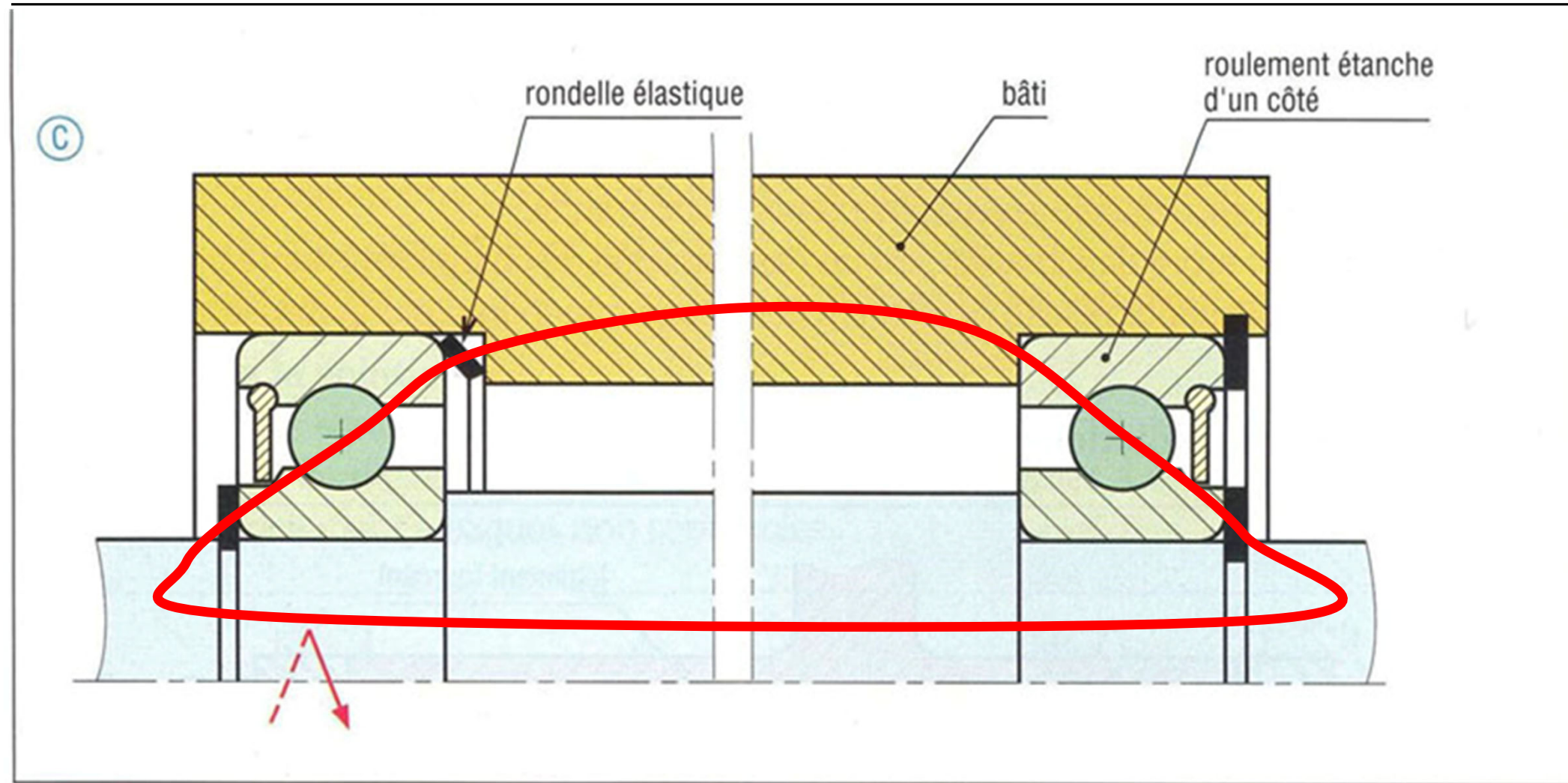
| | |
|--------------|----------|
| Palier 1 BI: | serrée |
| Palier 1 BE: | avec jeu |
| Palier 2 BI: | serrée |
| Palier 2 BE: | avec jeu |

Fixation latérale des bagues de roulements:
Combinaison des épaulements – Exercice 2: Cheminement des efforts dans un montage

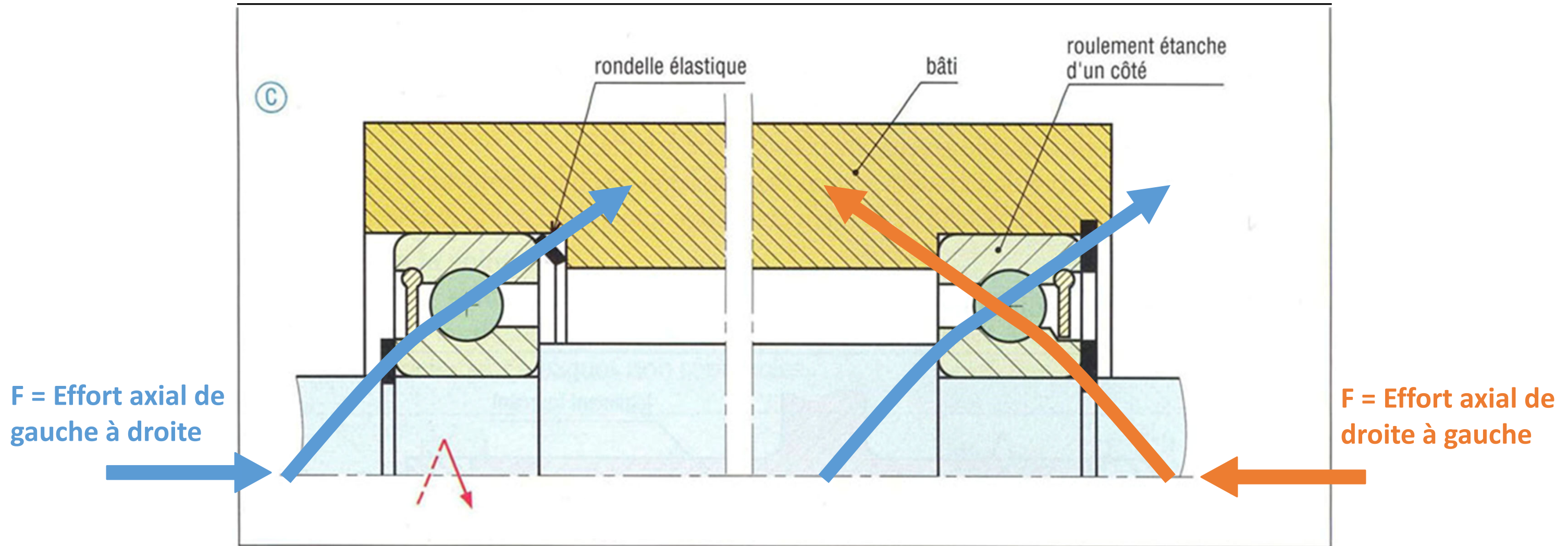


Dans la figure ci-dessus la rondelle élastique engendre un effort interne, appelé une précontrainte. Tracer une ligne continue à travers tous les éléments qui subissent (qui sont traversés par) cet effort interne. Cette ligne représente le cheminement de l'effort de précontrainte et doit former une boucle fermée.

Fixation latérale des bagues de roulements:
Combinaison des épaulements – Exercice 2: Cheminement des efforts dans un montage

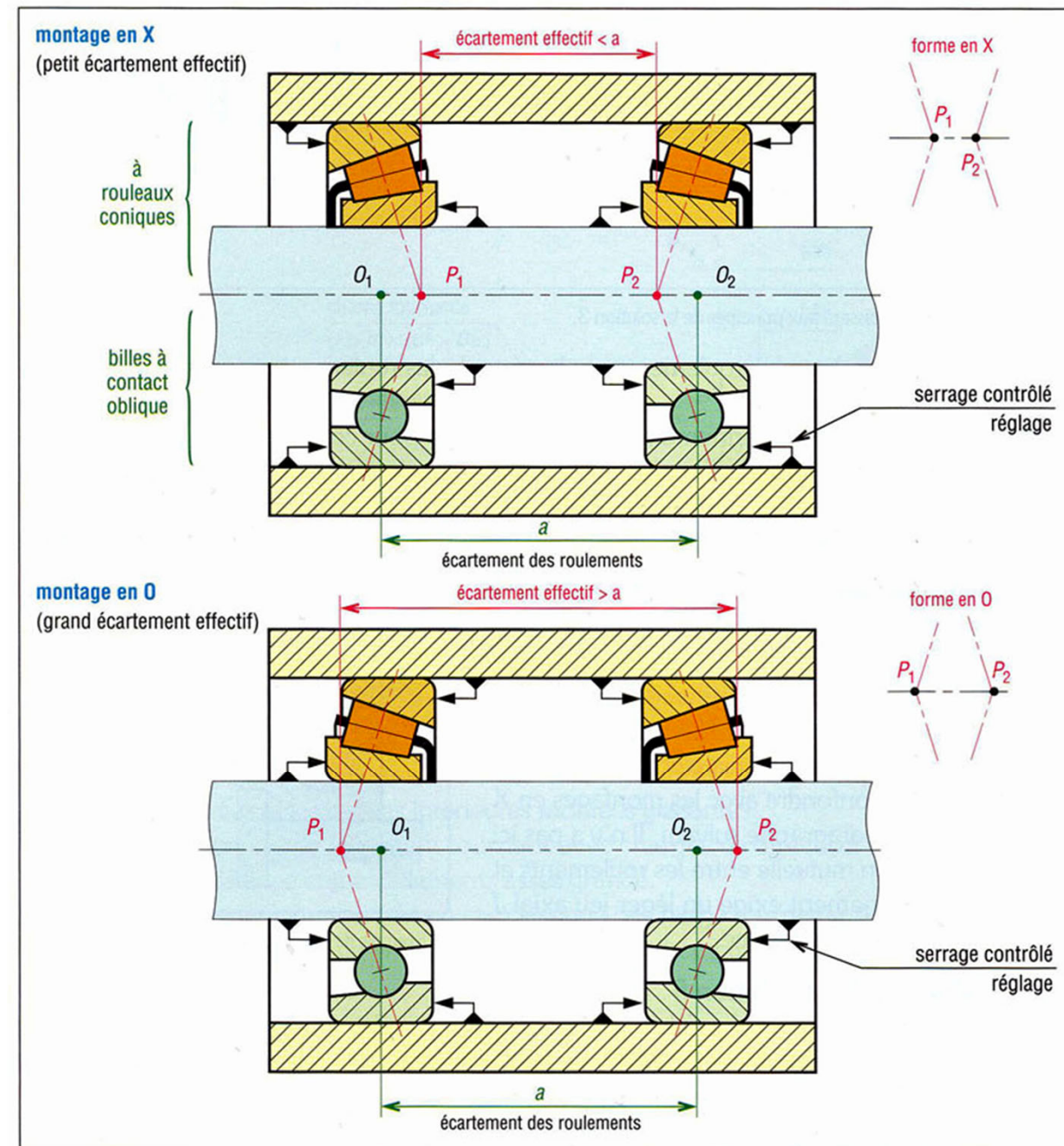


Fixation latérale des bagues de roulements:
Combinaison des épaulements – Exercice 2: Cheminement des efforts dans un montage



Montage des roulements à contact oblique ou à rouleaux coniques

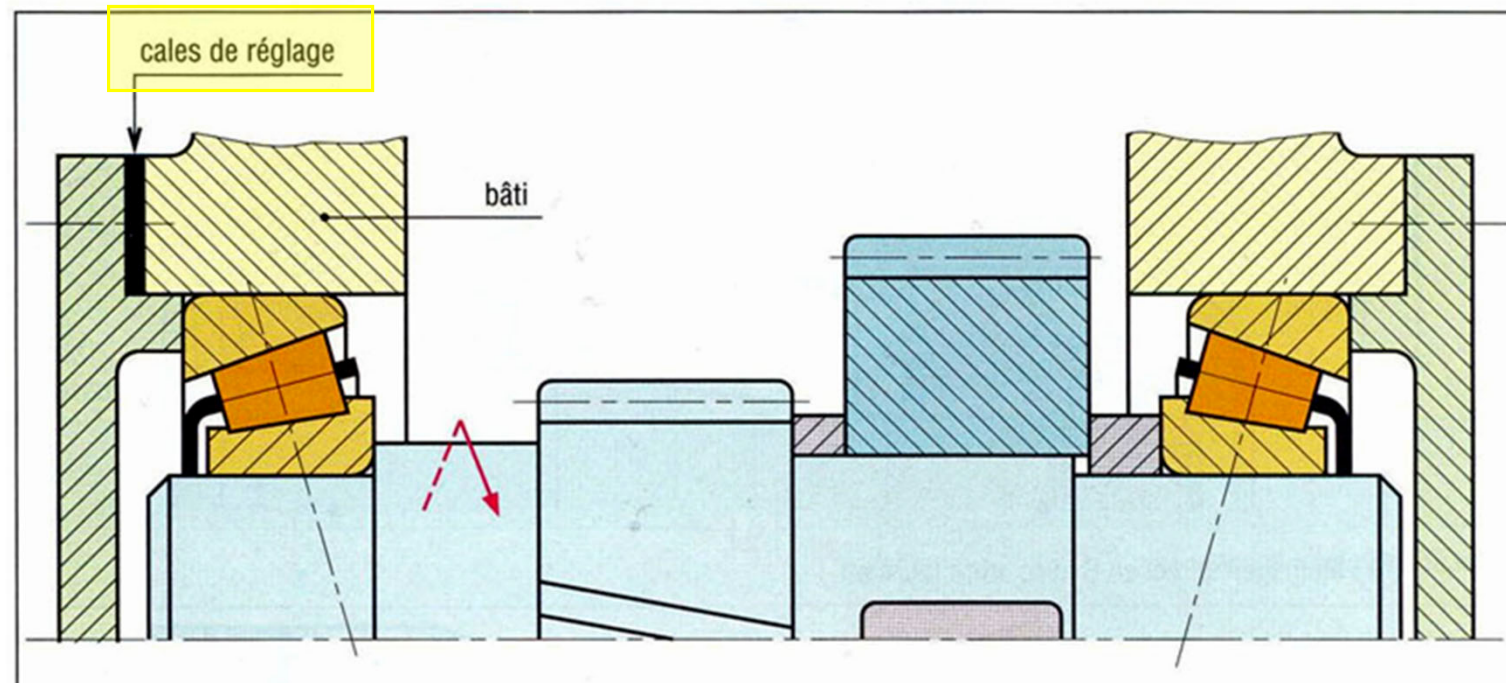
- Ces roulements doivent être montés par paire et en opposition
- Les montages demandent des usinages précis



Montage des roulements à contact oblique ou à rouleaux coniques

Montage en X ou montage direct

- Plus simple et économique que le montage en O
- Réglage du jeu interne sur les bagues extérieures
- Charge/transmission entre les roulements
- Dilatation charge les roulements



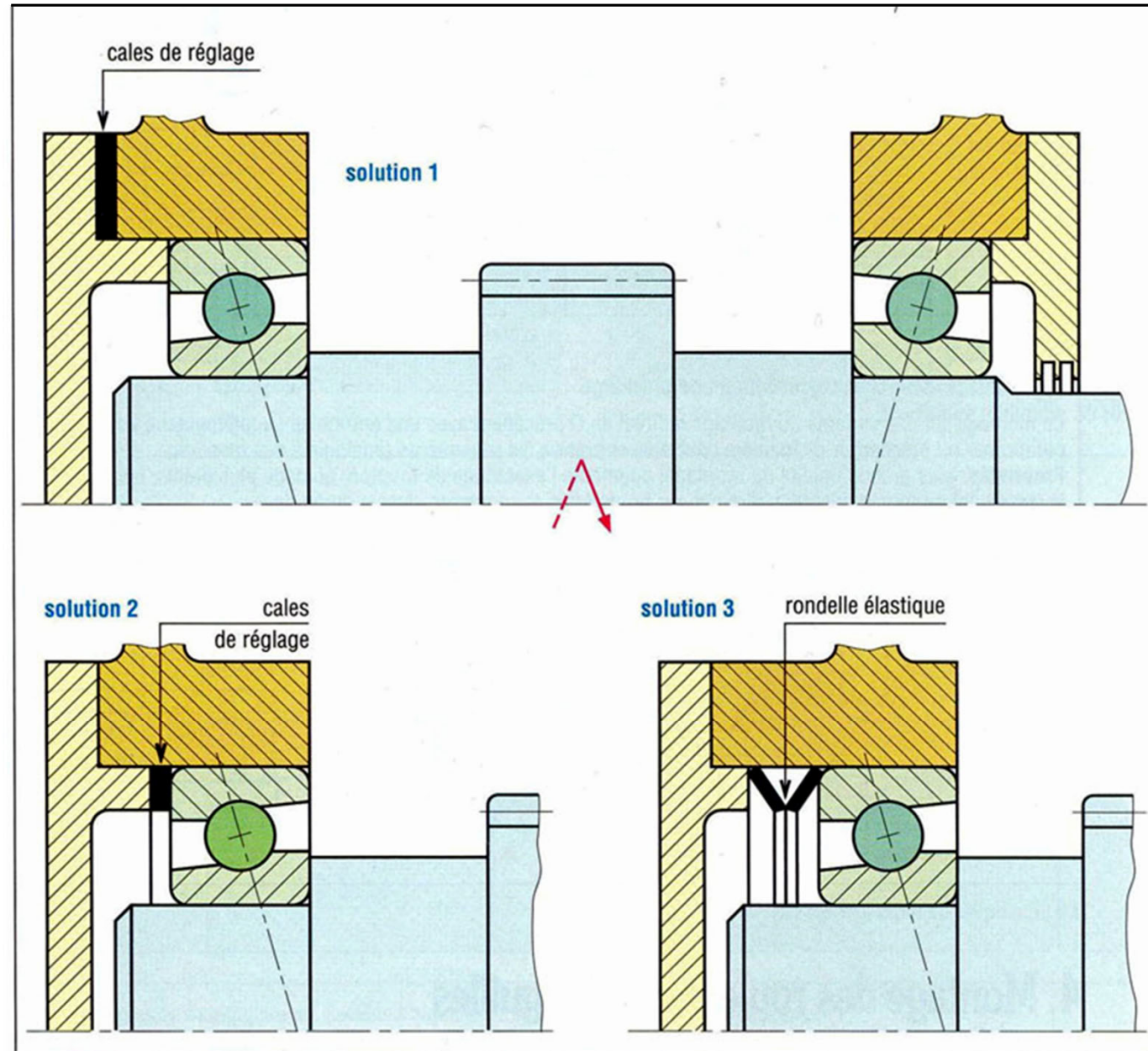
Montage des roulements à contact oblique ou à rouleaux coniques

Montage en X ou montage direct - Exemples

Solutions 1 & 2:

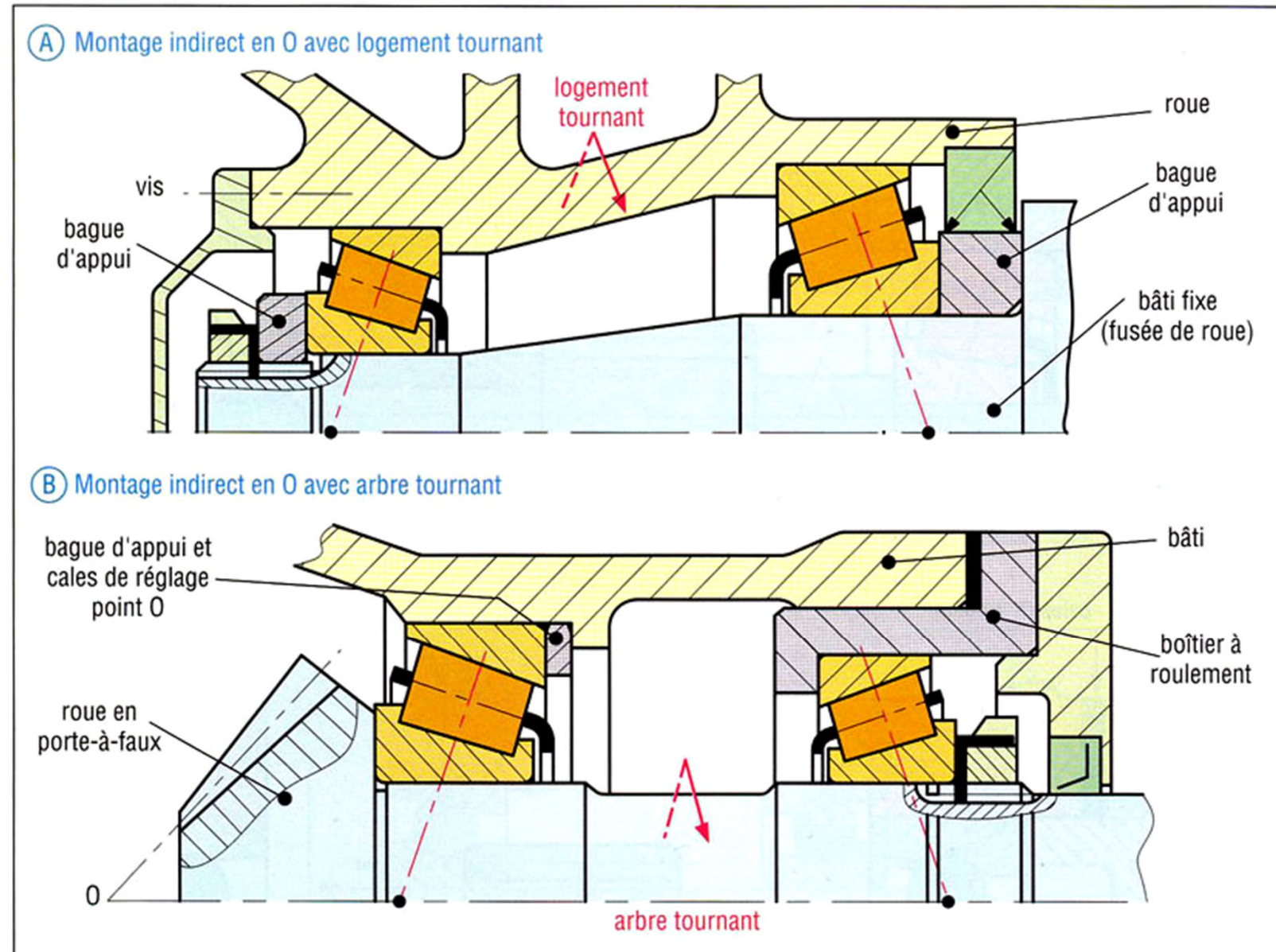
- Si l'arbre se dilate plus que le bâti, risque de serrage
- Si les arbres sont longs, mettre des rondelles élastiques pour reprendre les dilatations.

Attention aux effets thermiques



Montage des roulements à contact oblique ou à rouleaux coniques

Montage en O ou montage indirect



- Plus rigide
- Réglage sur les bagues intérieures
- Préférable avec logement tournant
- Utilisé pour arbre tournant avec porte-à faux du aux charges/transmissions
- Dilatation arbre diminue les charges sur les roulements et augmente le jeu interne

Attention aux effets thermiques

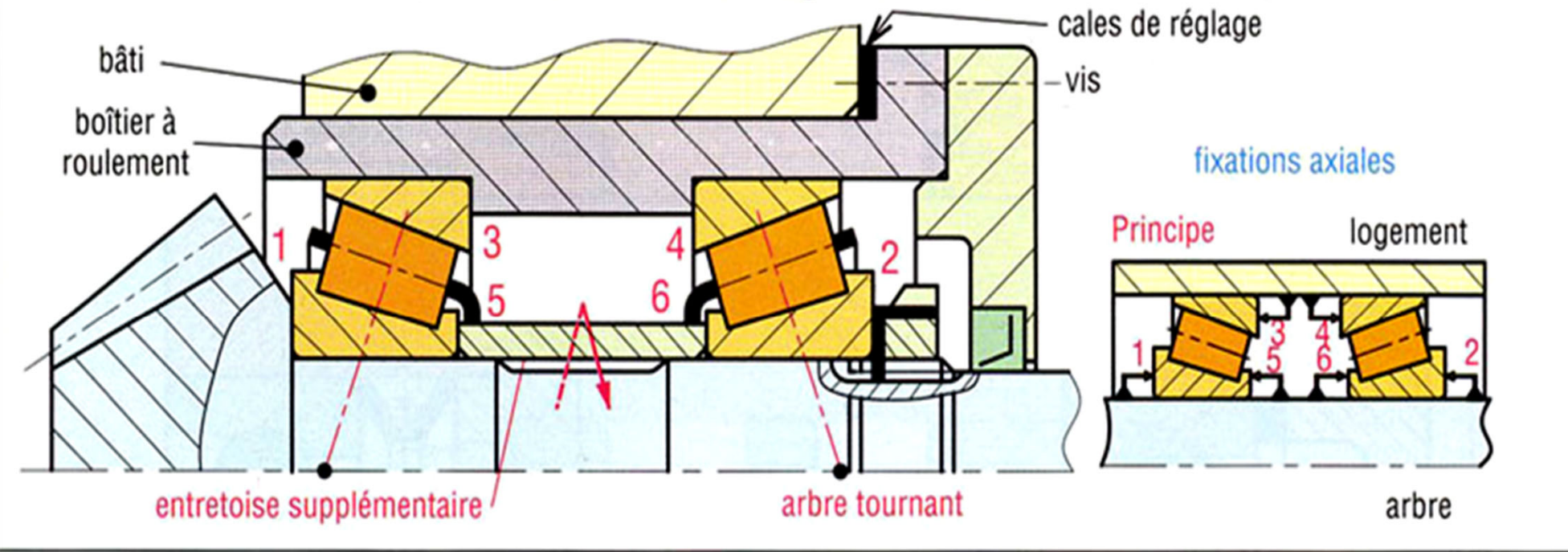
Montage des roulements à contact oblique ou à rouleaux coniques

Montage en O ou montage indirect

© Montage indirect en O précontraint ou préchargé

Ce montage est une variante du montage indirect en O précédent avec une entretoise supplémentaire permettant de comprimer ou précharger de manière contrôlée et précise les roulements (analogie à des ressorts).

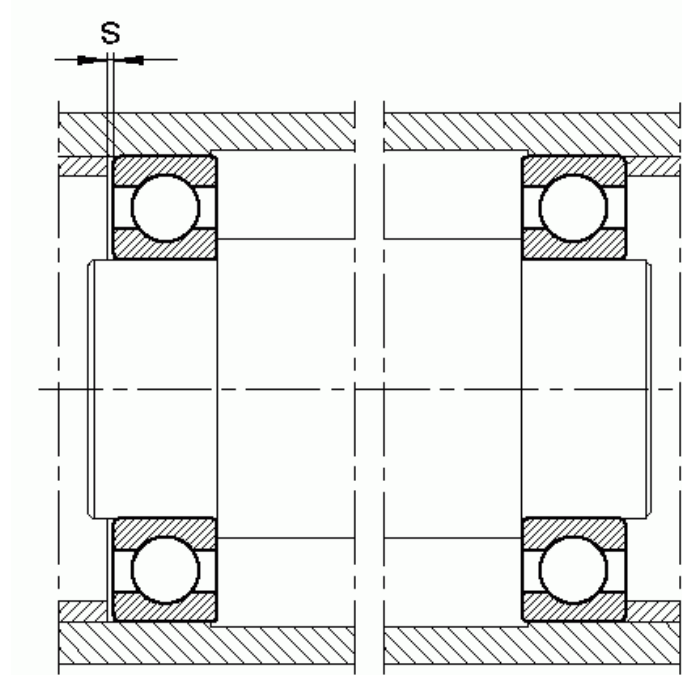
Propriétés: plus grande rigidité du montage, augmente l'exactitude de rotation, guidage plus précis, compense l'usure et le tassement en fonctionnement, diminue les bruits émis et augmente ainsi la durée de vie.



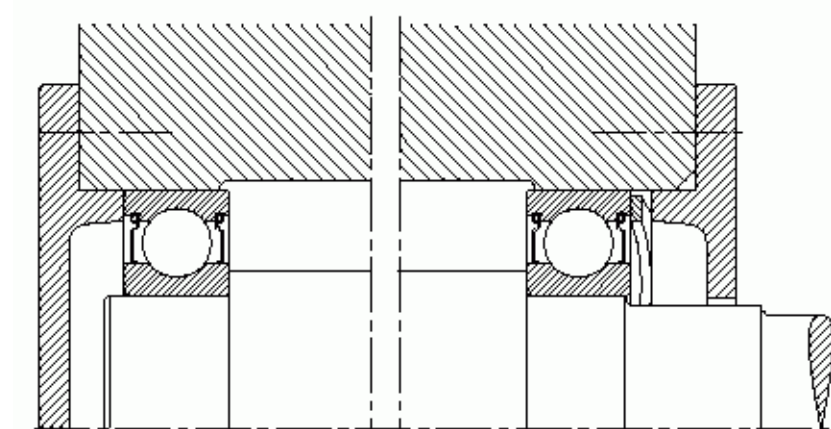
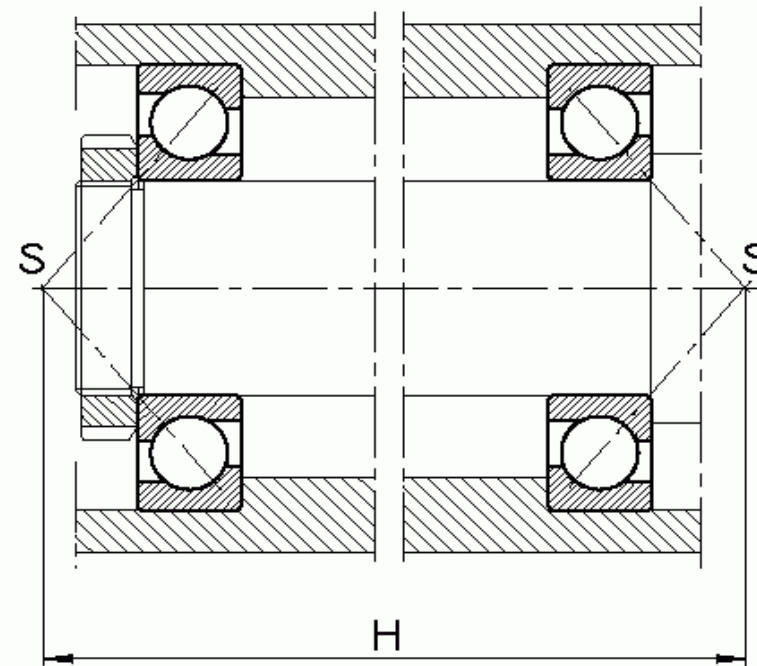
Jeu axial de montage

Courant: 0,2 - 0,3 mm

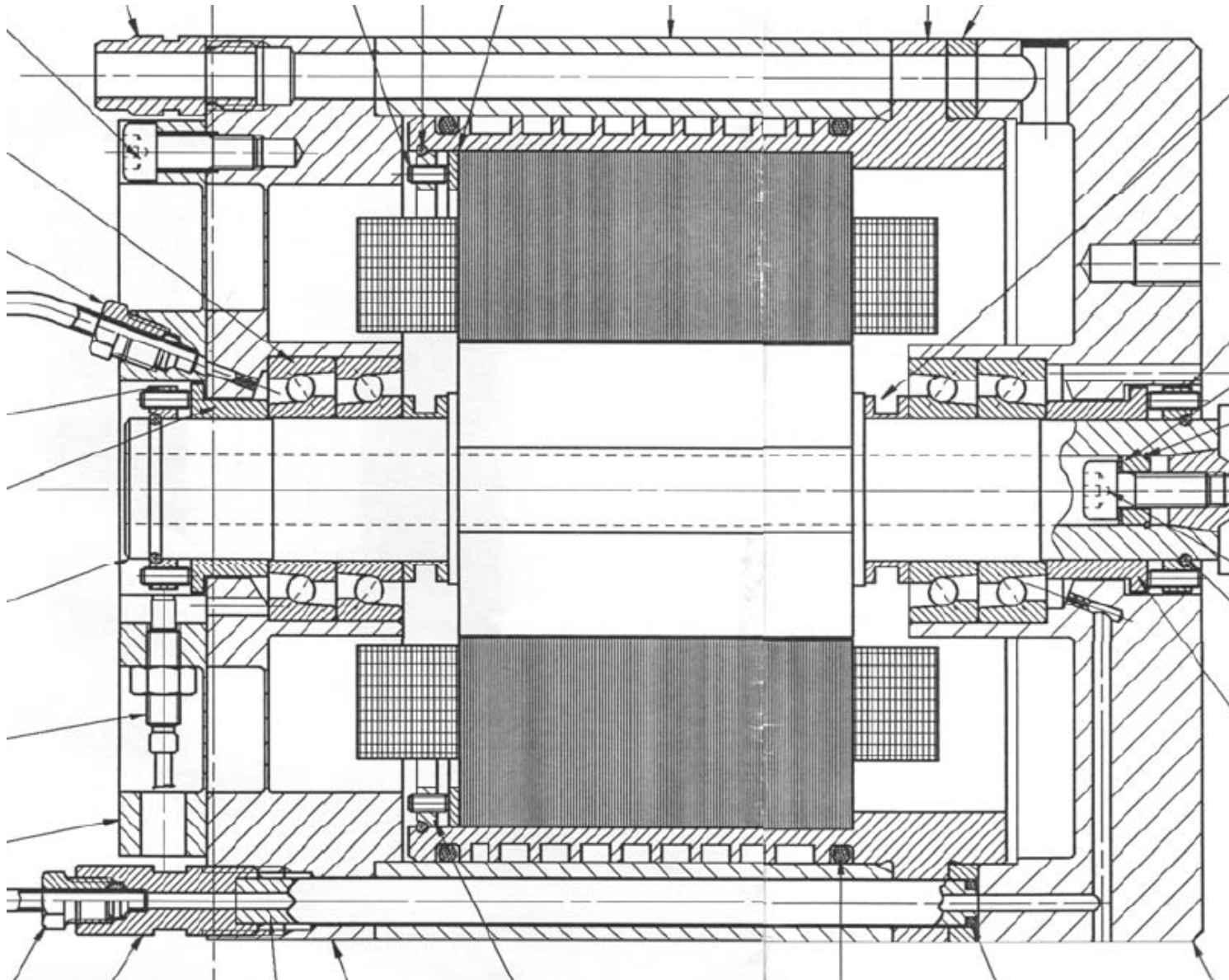
Précis: 0,05 - 0,15 mm



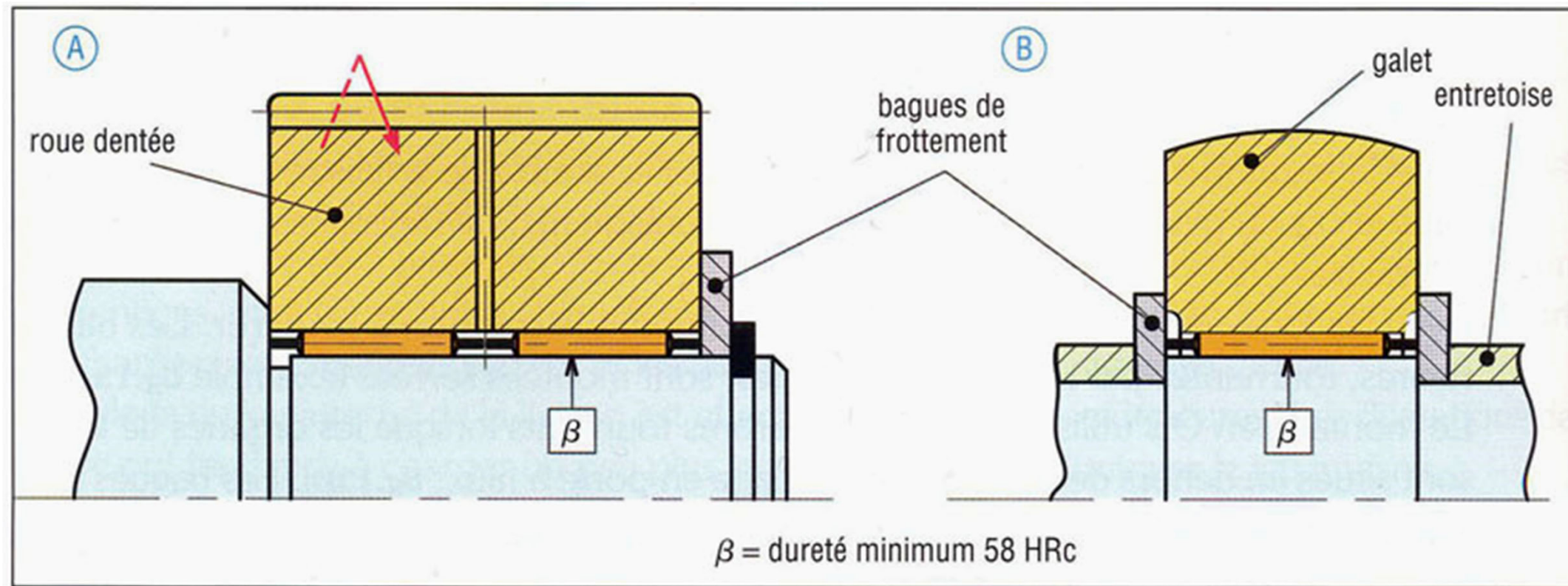
Précontrainte



Montage des roulements à contact oblique ou à rouleaux coniques
Application: Prototype de motobroche (moteur AC, faible vibration pour rectifieuse)



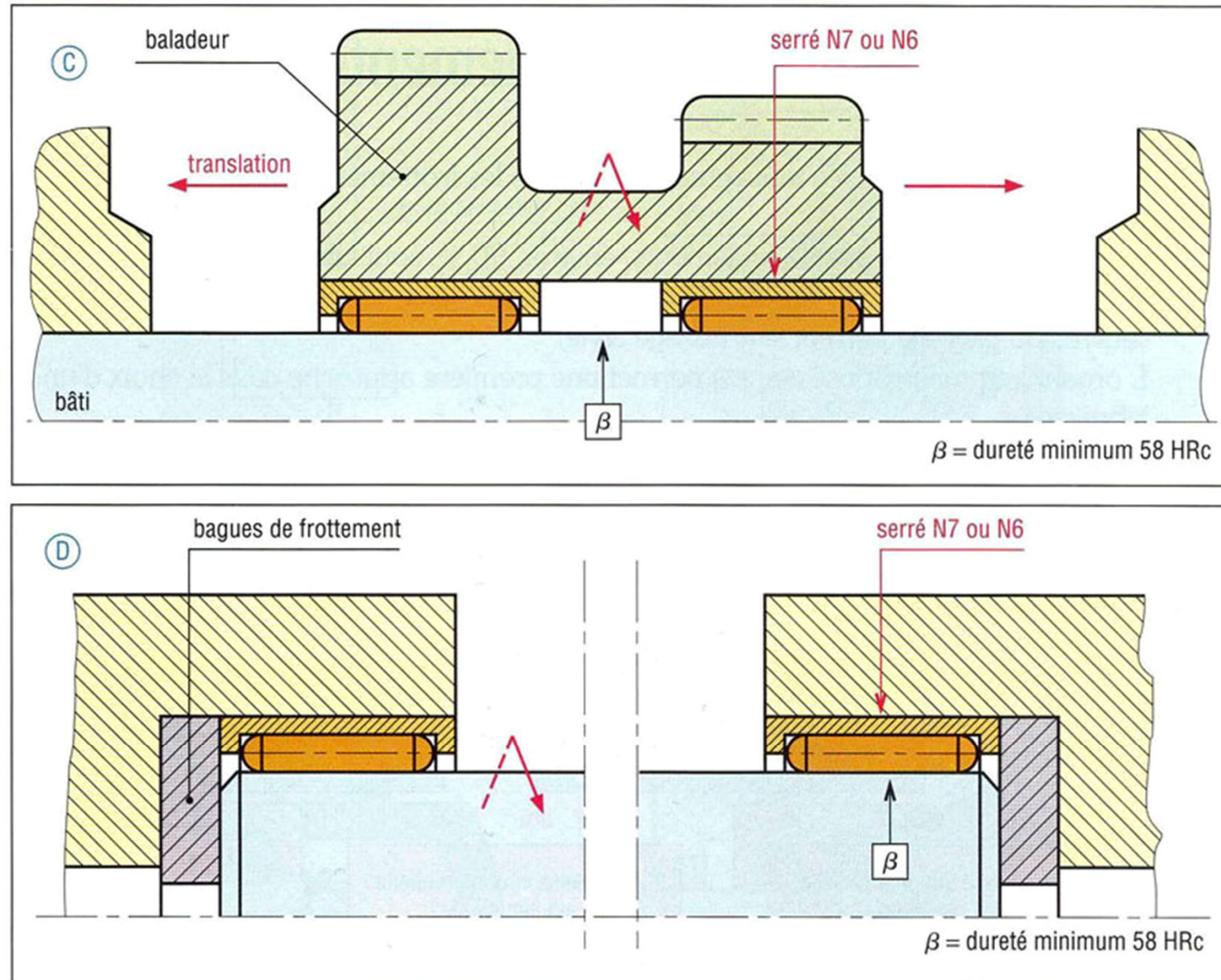
Montage des roulements à aiguilles – Cages a aiguilles



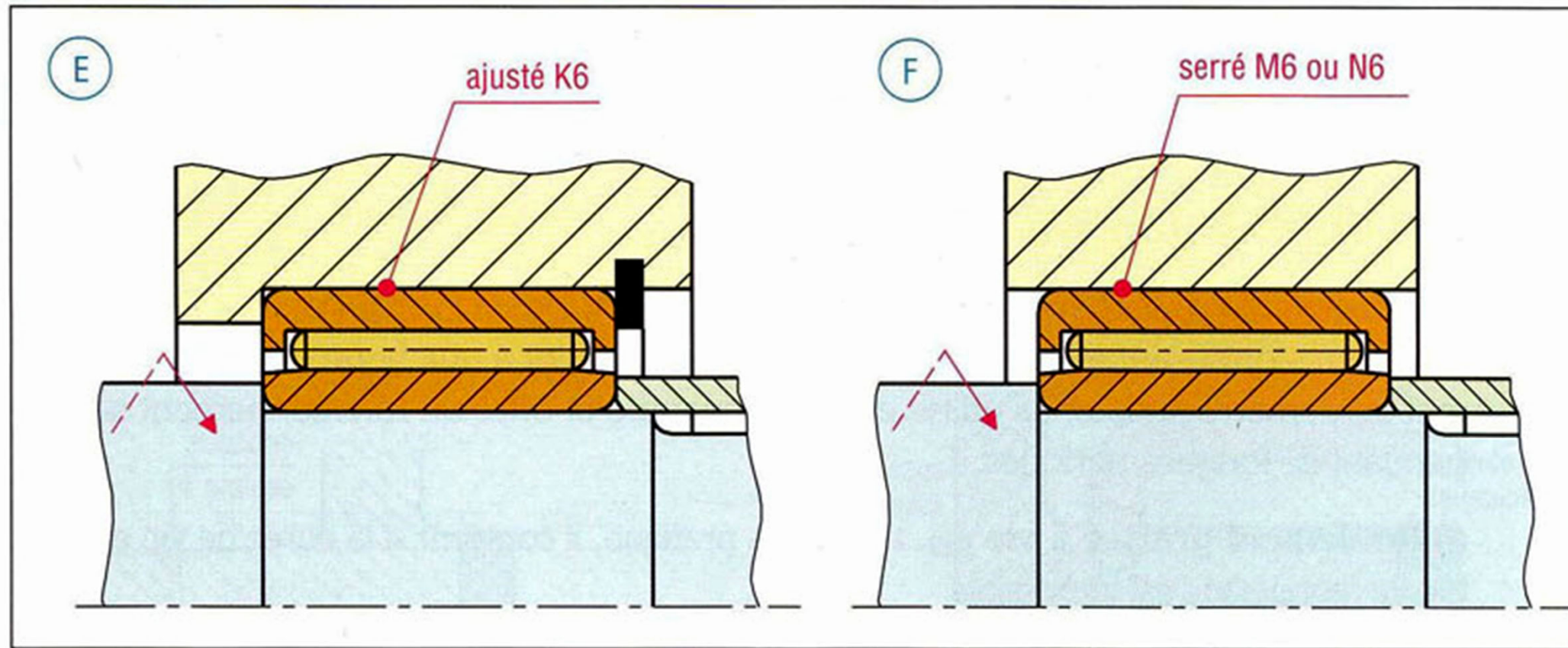
Ne tolèrent pas de charges axiales. Faibles charges axiales reprises par bagues de frottement ou par un autre roulement

Si charges axiales, introduire un roulement les tolérant.

Montage de douilles à aiguilles



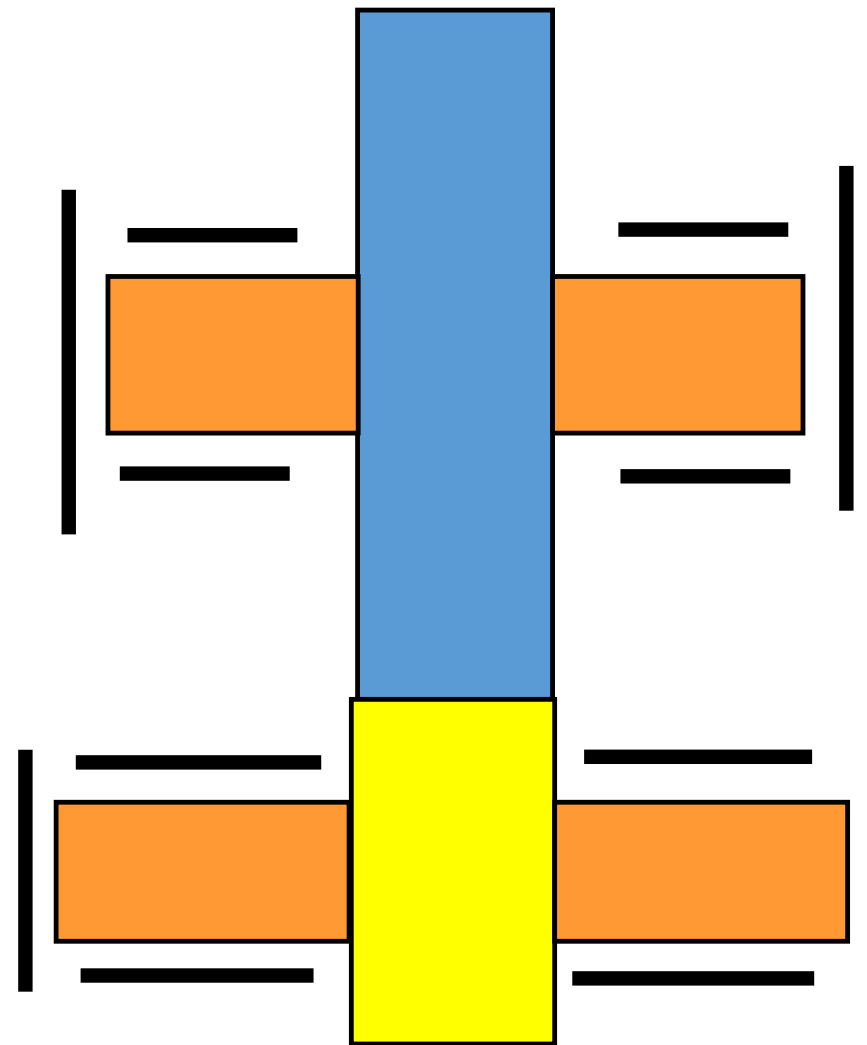
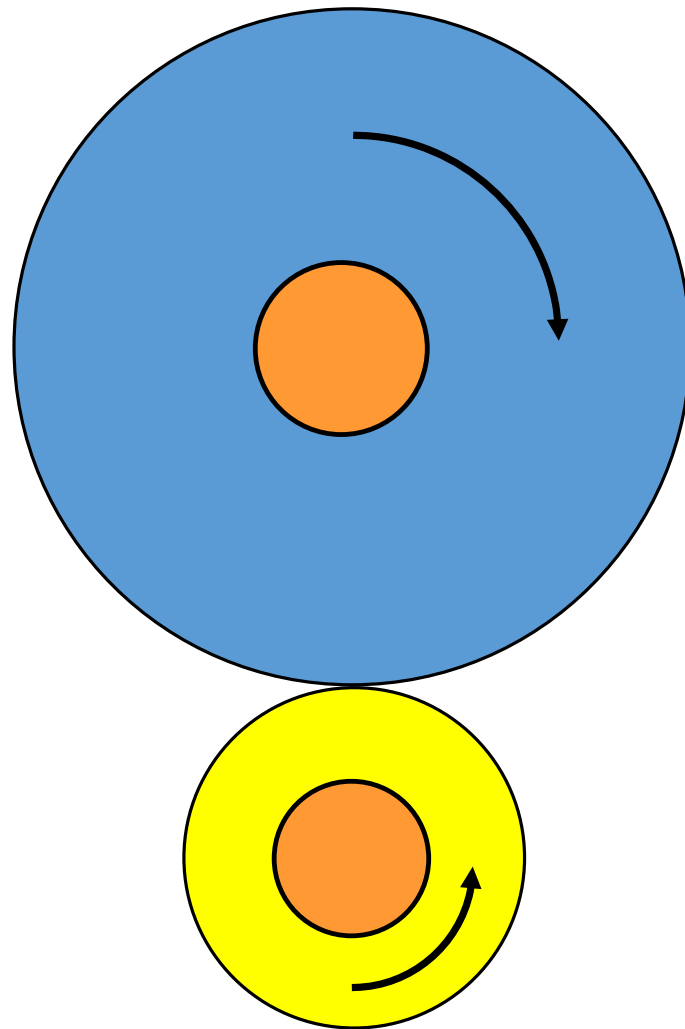
Montage de roulements à aiguilles - Exemples



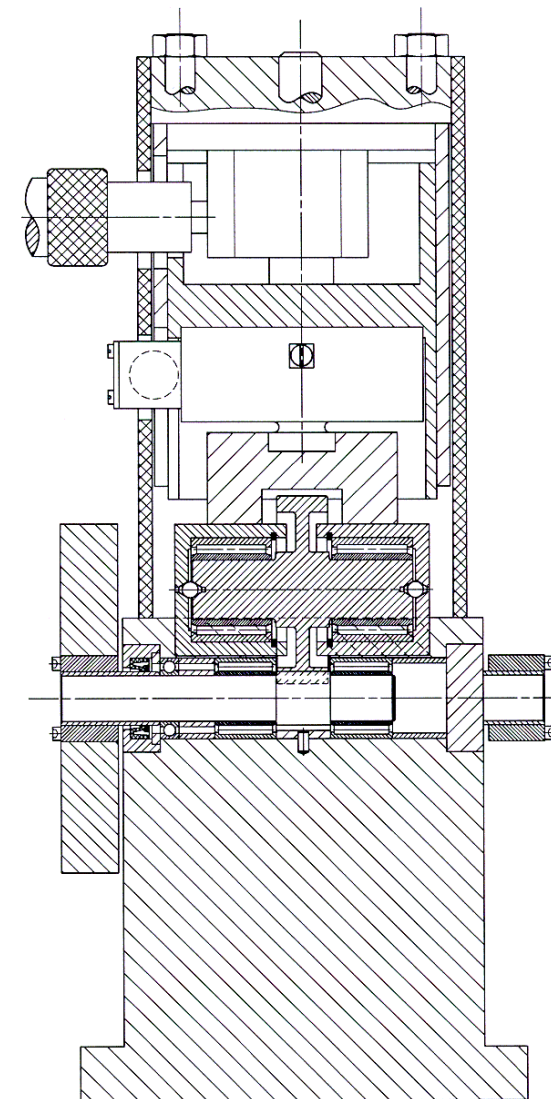
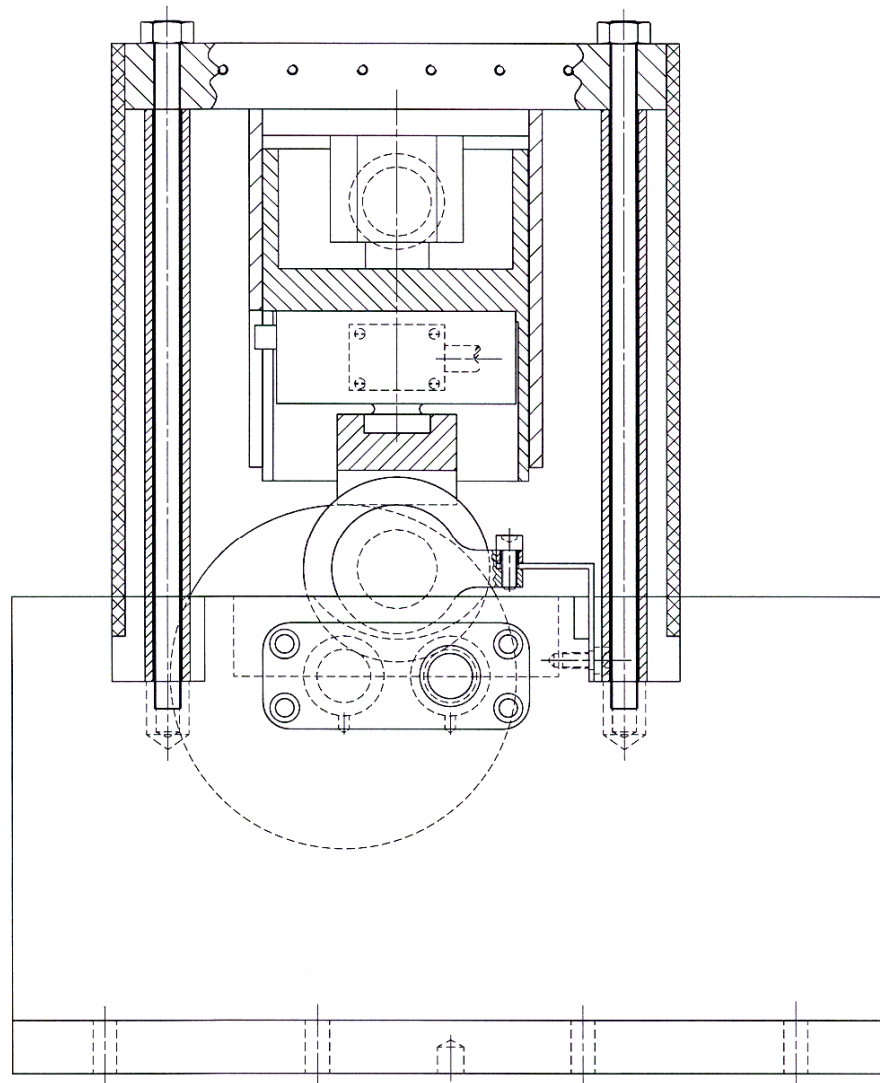
Pour charges radiales élevées

Montés épaulés (E) avec charges élevées ou serrés (F) avec charges modérées

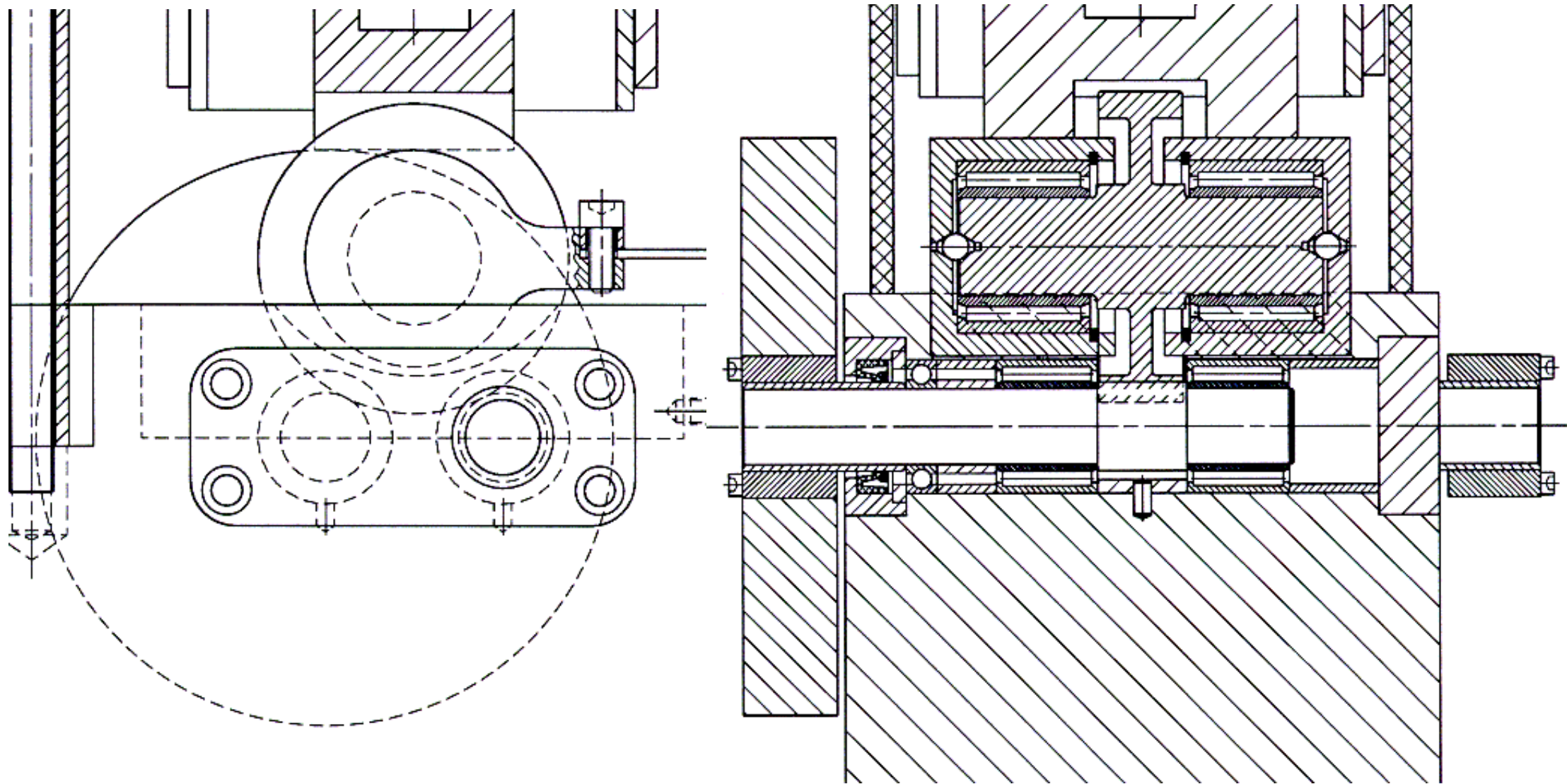
Montage de roulements à aiguilles
Application: transmission à galets lisses



Montage de roulements à aiguilles
Application: transmission à galets lisses



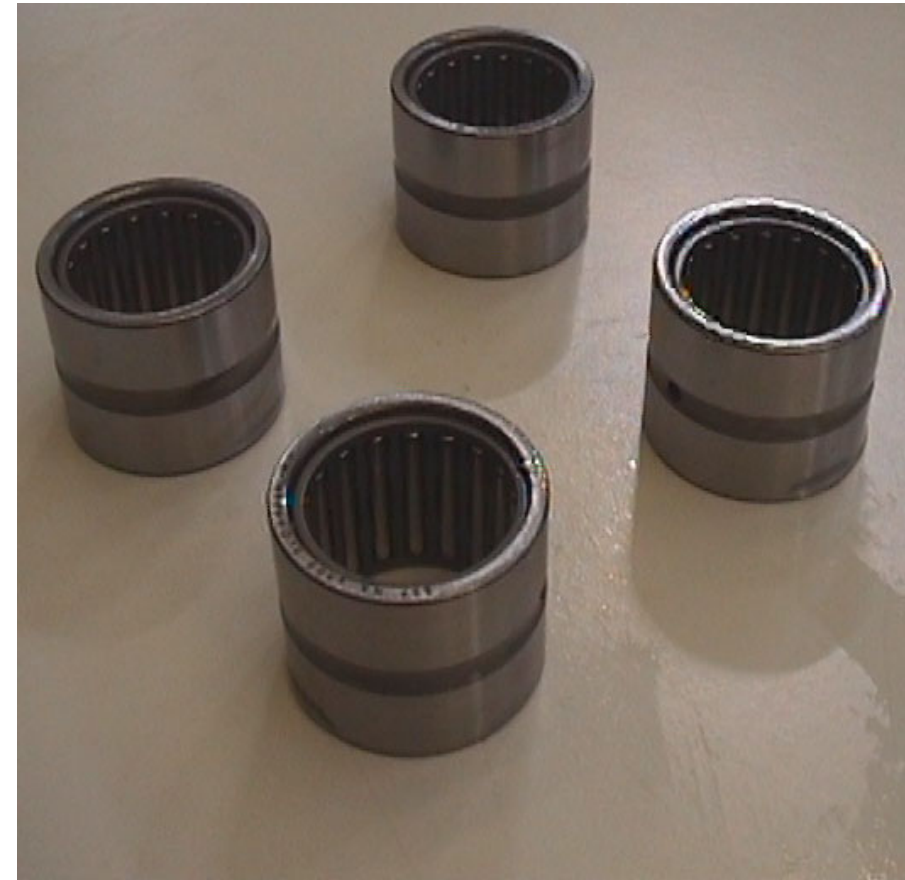
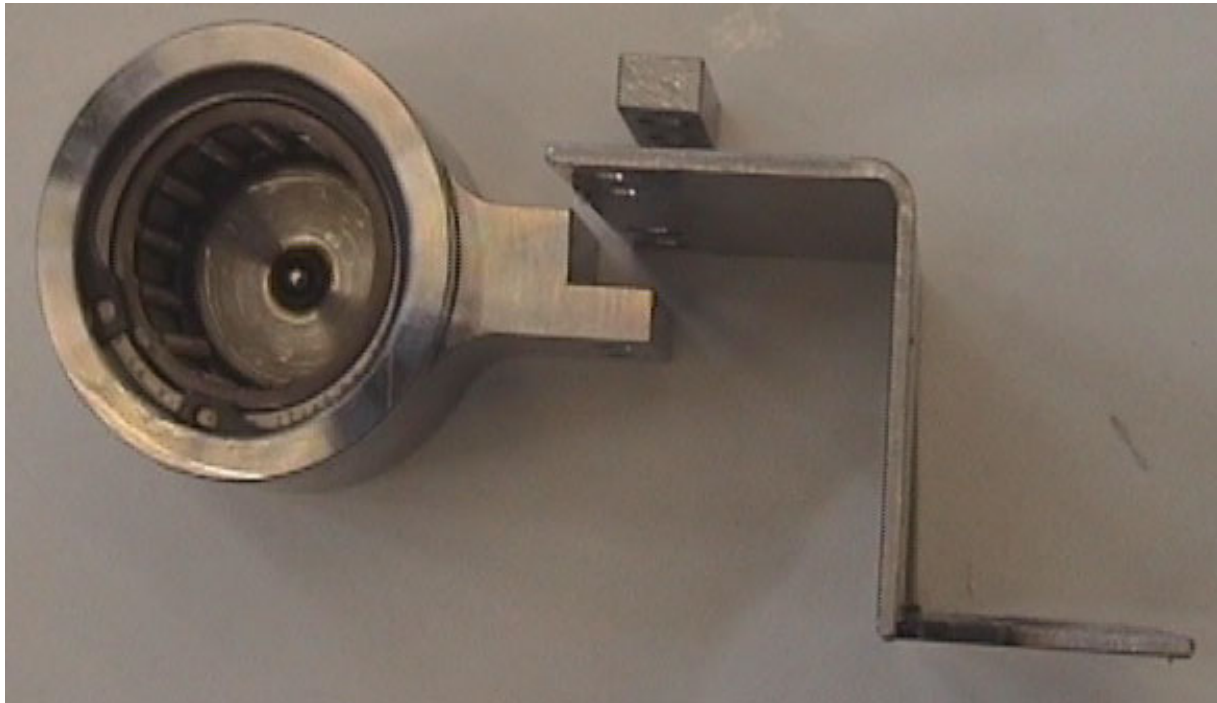
Montage de roulements à aiguilles
Application: transmission à galets lisses



Montage de roulements à aiguilles
Application: transmission à galets lisses



Montage de roulements à aiguilles
Application: transmission à galets lisses



Calculs et Dimensionnement

Durées de vie d'équipements

heures

Machines pour usage ménager, machines agricoles,
équipements à usage médical

300 ... 3000

Machines utilisées pendant de courtes périodes ou intermittent :
outillage à main électrique, petits appareils de levage, ...

3 000 ... 8 000

Machines utilisées pendant de courtes périodes ou intermittent,
à haute fiabilité : ascenseurs, grues, ...

8 000 ... 12 000

Machines utilisées 8 h par jour en intermittent :
engrenages, moteurs électriques, Broyeurs, ...

10 000 ... 25 000

Machines utilisées 8 h par jour en permanence : machines outils, machines
à bois, ventilateurs, convoyeurs, matériel d'imprimerie, ...

20 000 ... 30 000

Machines utilisées en continu 24h sur 24: laminoirs, compresseurs,
pompes, machines textile, treuils de mine, ...

40 000 ... 50 000

Fours rotatifs, machines à toronner, moteurs pour bateaux,
machines de traitement d'eau, ...

60 000 ... 100 000

Grosses machines électriques, usines de génération de puissance,
Ventilateurs de mine, pompes de mine, paliers d'hélice bateaux

> 100 000

Calculs et Dimensionnement

Durées de vie d'équipements 10^6 km

Véhicules routiers : roulements

Voitures particulières 0,3

Véhicules commerciaux, bus 0,6

Véhicules sur rail : roulements

Wagons de marchandises 0,8

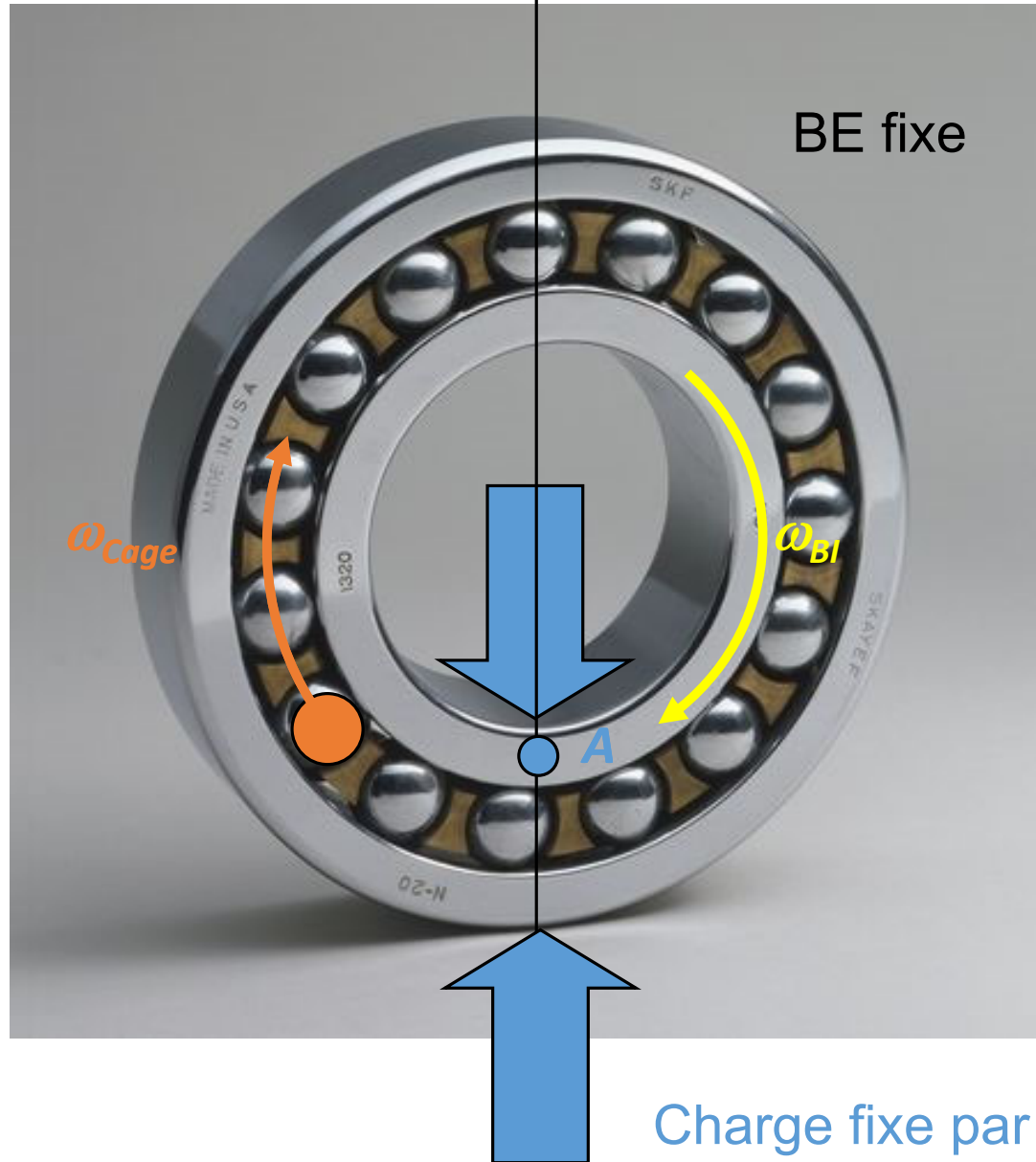
Tramways, trains banlieue 1,5

Wagons trains grandes lignes 3

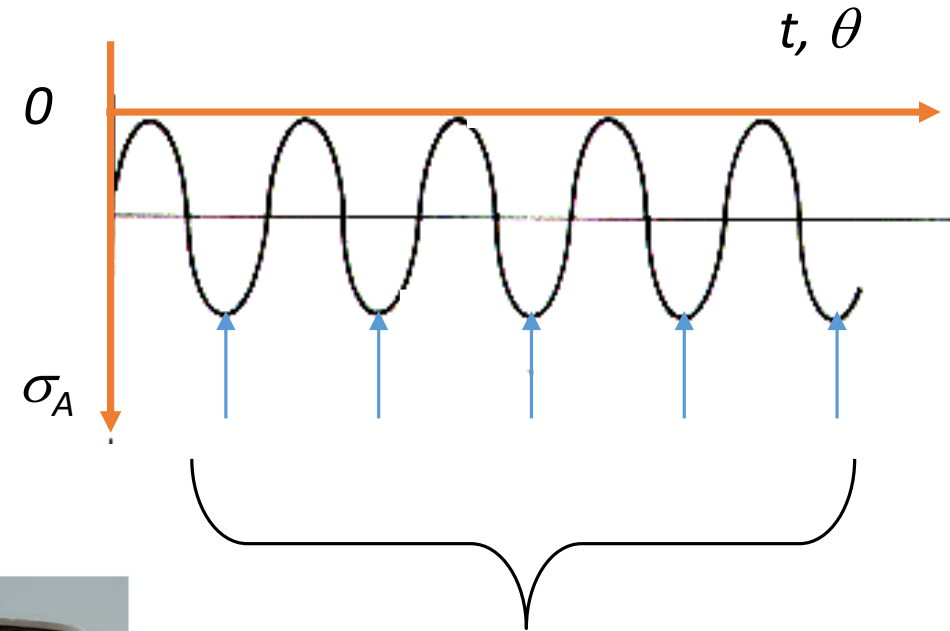
Moteurs locomotives trains grandes lignes 3 ... 4

Locomotives diesel et électriques grandes lignes 3 ... 5

Problématique: Fatigue de surface



Charge fixe par rapport à la BE



Passages de A sous la charge

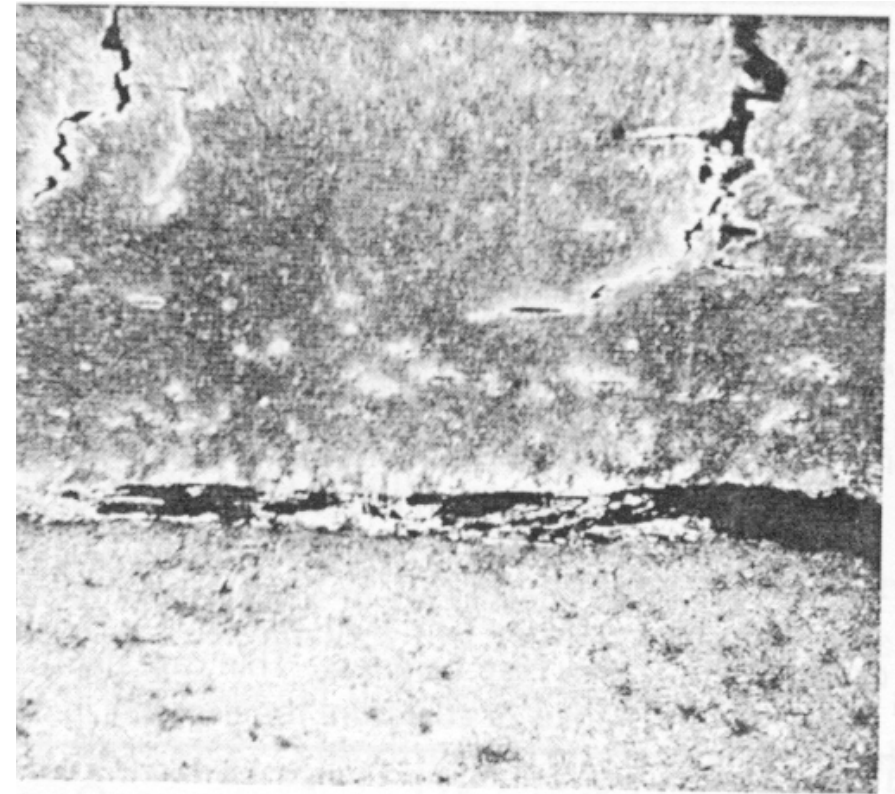
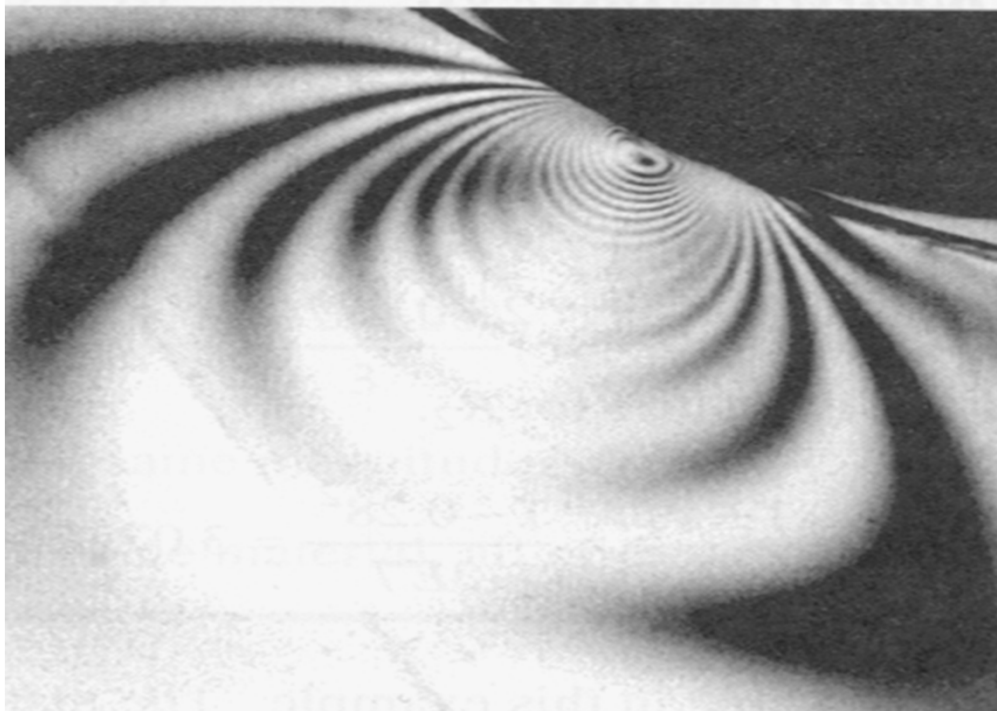
$$\omega_{Cage} \approx \frac{1}{2} \omega_{BI}$$



Problématique: Fatigue de surface

Source: R.L. Norton, *MACHINE DESIGN, an Integrated Approach*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1998.

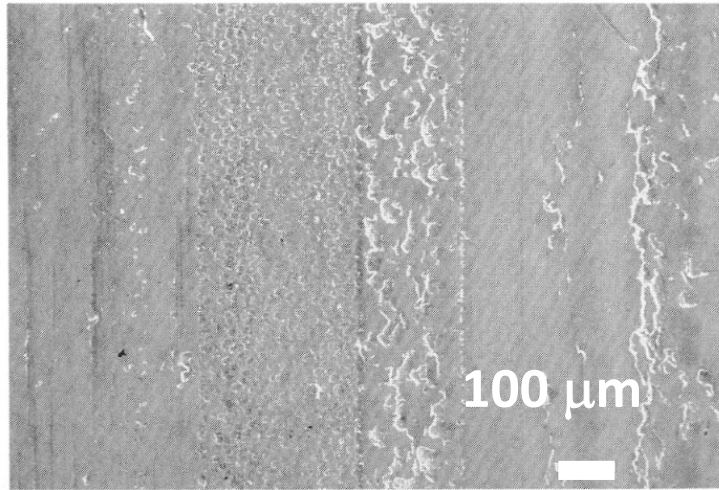
Surface



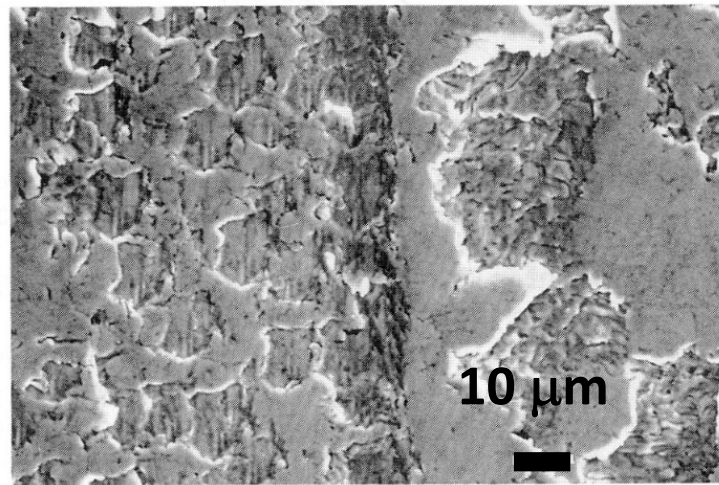
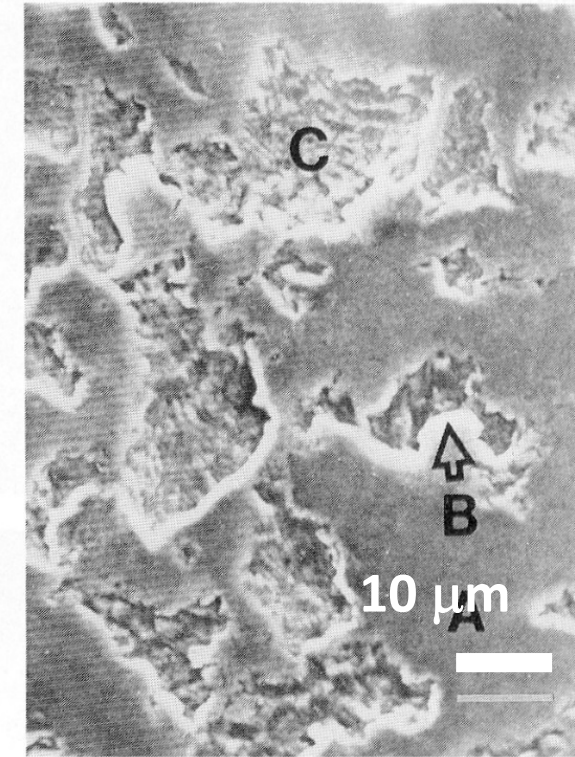
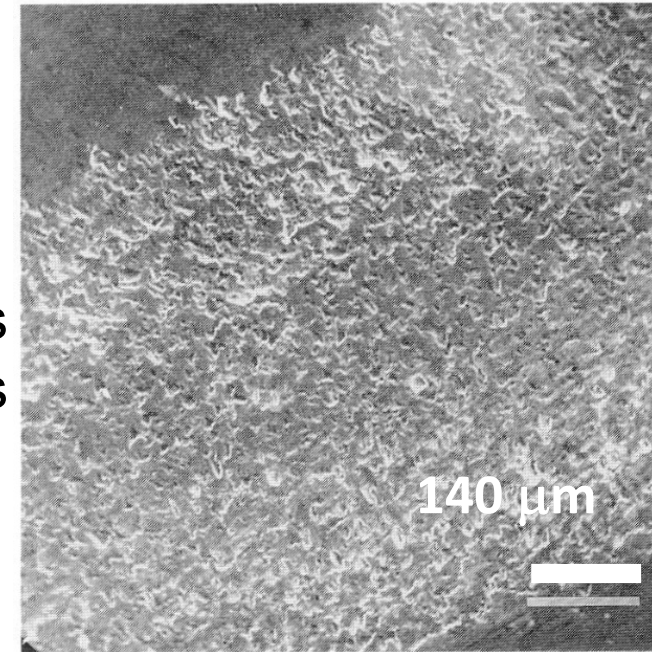
Contact Hertzien → Endommagement de contact

Problématique: Fatigue de surface – Fissuration, écaillage

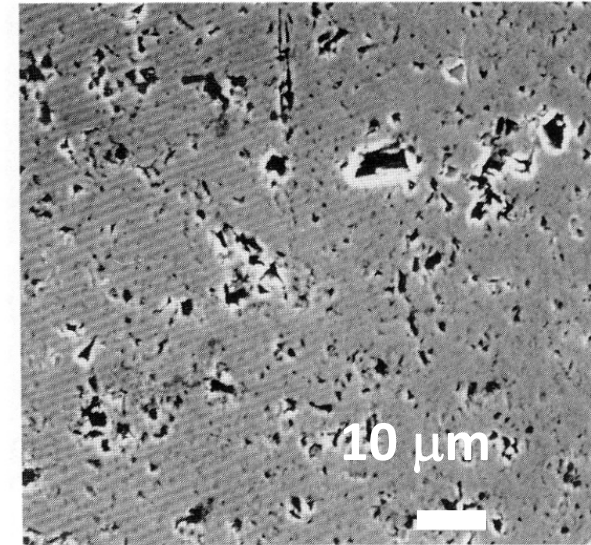
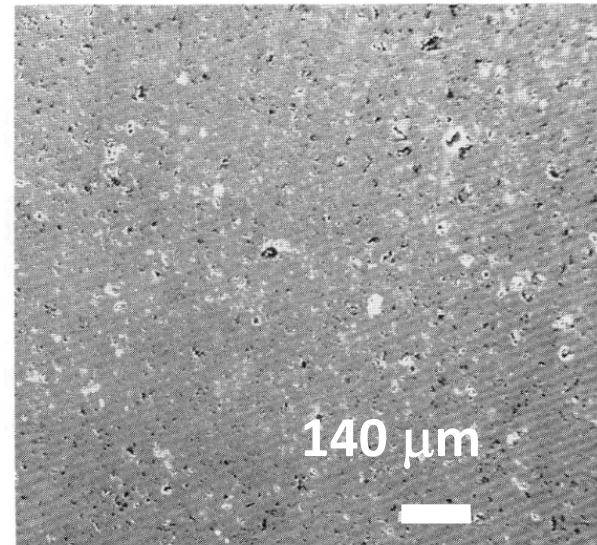
Source: Tallian, T. E., *Failure Atlas for Hertz Contact Machine Elements*, ASME Press, New York, 1992



Roulement à billes à gorges profondes

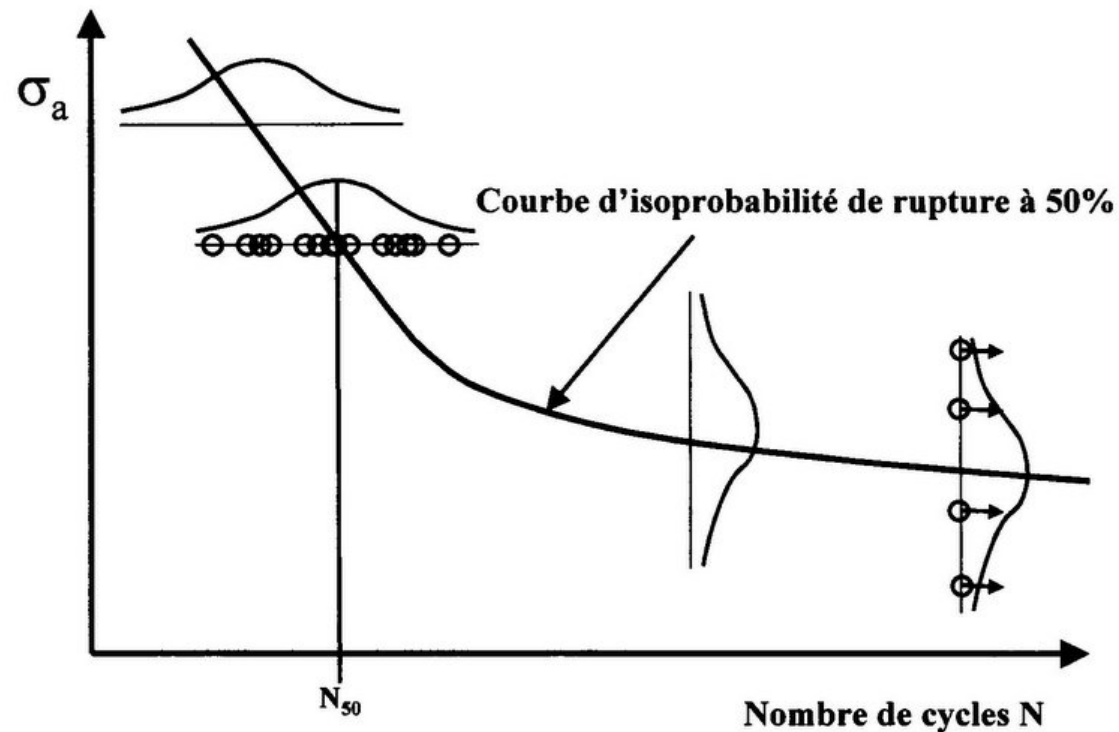


Roulement à galets cylindriques



Roulement à billes à contacts obliques

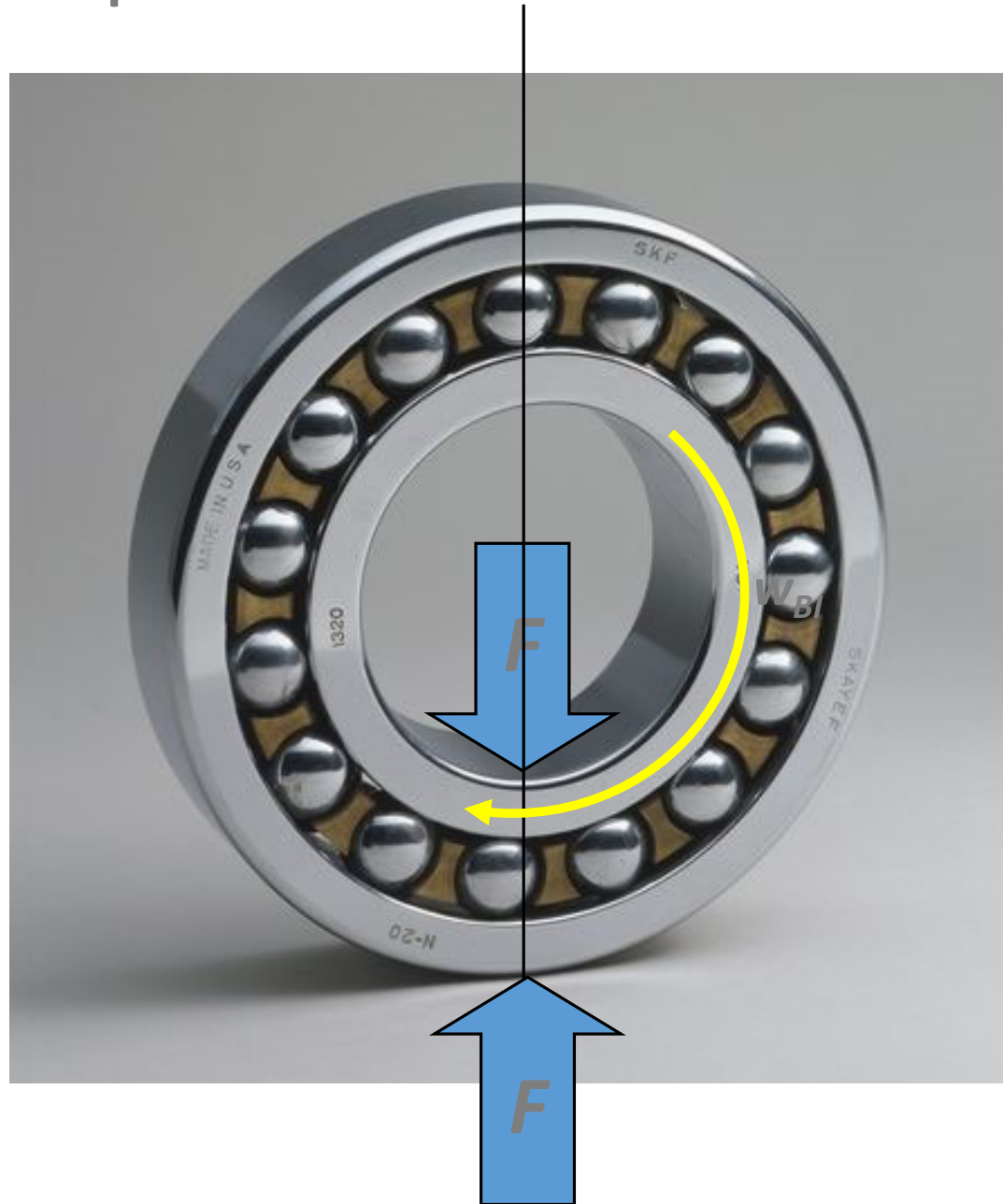
Problématique: Fatigue de surface



Durée de vie suit une distribution statistique dite de WEIBULL

- Durée de vie d'un roulement dépend:
 - Charge
 - Lubrification
 - Vitesse de rotation
 - Température
 - Protection
 - *Montage*
 - ...
- Durée de vie distribuée statistiquement
- Fatigue: phénomène «aléatoire»

Approche pour l'estimation de la durée de vie des roulements



- Essais de durée de vie pour:
 - un type de roulement
 - une charge
 - une vitesse
 - des conditions de lubrification et de protection
 - Un montage
 -

donnés, par les fabricants

Définition: durée de vie normalisée des roulements

- L_{10} = durée de vie normalisée d'une série de roulements identiques soumis à la même charge (et conditions d'essais).
- L_{10} = nombre de tours réalisé par 90% des roulements de la série avant qu'apparaissent les premiers signes de fatigue.
- L_{10} = durée de vie (moyenne statistique) basée sur une fiabilité de 90%, i.e. 90% de survie après essai sur un même lot.
- L_{10} sert de référence à tous les roulements de la série
- L_{10} exprimé en millions de tours (ou en heures)
- Selon **ISO 281**: Charges dynamiques de base et durée nominale

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Durée de vie $L =$

nombre de millions de tours sous charge appliquée

Durée de vie nominale $L_{10} =$

nombre de millions de tours atteints par 90% des roulements d'un même lot

$$L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^p$$

C = capacité de charge dynamique du roulement (nombre fabricant)

P = charge radiale équivalente

p = exposant de fatigue : 3 pour billes

10/3 pour rouleaux

Définition: durée de vie normalisée des roulements

$$L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^p$$

Durée de vie corrigée: $L_n = a_1 a_2 a_3 L_{10}$

a_1 = facteur de fiabilité

a_2 = facteur de matériau, géométrie, fabrication

a_3 = facteur de fonctionnement (lubrification, vitesse, température, ...)

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

Choix et détermination d'un roulement

Durée de vie corrigée:

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left[\frac{C}{P} \right]^p$$

$$F = e^{\left(-0,105 \frac{\frac{L_n}{L_{10}} - 0,025}{0,975} \right)^{1,5}}$$

D'après SKF

- a_1 **facteur relatif à la fiabilité**
- a_2 facteur relatif au matériau
- a_3 facteur relatif au fonctionnement

| F Fiabilité (%) | L_n | a_1 |
|-----------------|----------|-------|
| 90 | L_{10} | 1 |
| 95 | L_5 | 0,62 |
| 96 | L_4 | 0,53 |
| 97 | L_3 | 0,44 |
| 98 | L_2 | 0,33 |
| 99 | L_1 | 0,21 |

Choix et détermination d'un roulement

Durée de vie corrigée: a_2 facteur relatif au matériau

Qualités de la matière et de son traitement thermique, capacité à tenir en température.

La norme admet des facteurs $a_2 > 1$ pour des roulements en acier d'une propreté particulièrement bonne.

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left[\frac{C}{P} \right]^p$$

| Code | Température maximale d'utilisation (°C) | a_2 |
|------------|--|-------|
| HT1 HT2 | 100 | 1,00 |
| | 140 | 0,87 |
| | 200 | 0,68 |

Choix et détermination d'un roulement

Durée de vie corrigée:

a_3 facteur relatif au fonctionnement

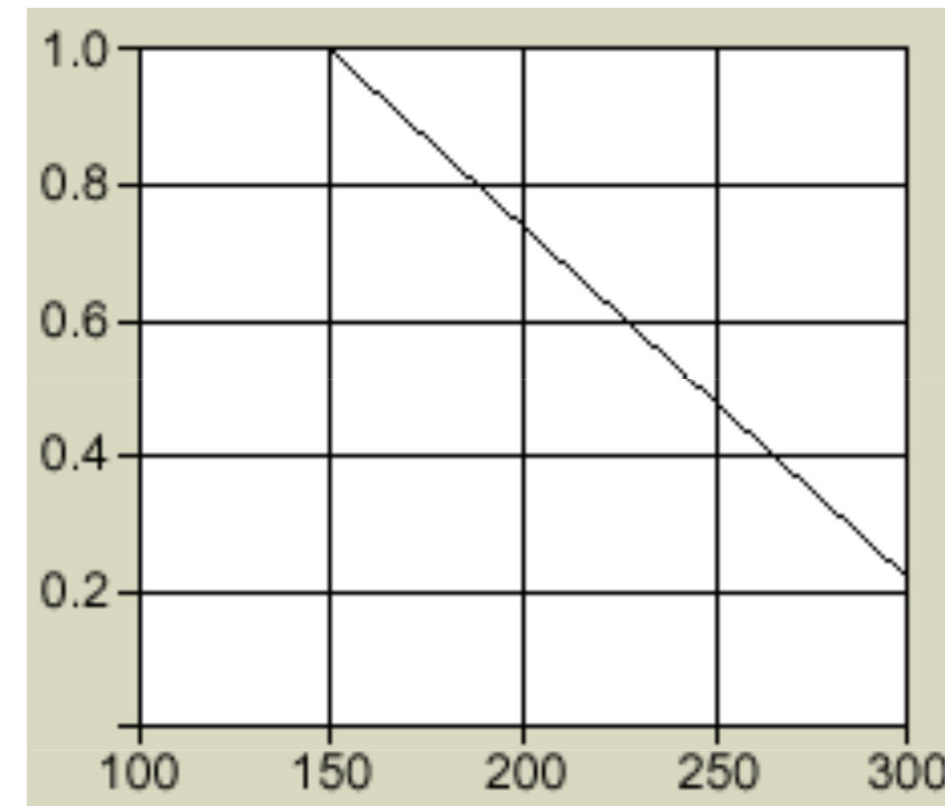
Facteur a_3 pour les conditions de fonctionnement:

- condition de lubrification
- à la vitesse
- à la température de fonctionnement

$$L_{na} = a_1 a_{23} \left[\frac{C}{P} \right]^p$$

La norme ne donne pas de valeur numérique pour ce facteur.

a_{23}



D'après NTN

Température (°C)

Choix et détermination d'un roulement

Durée de vie corrigée:

$$L_{na} = a_1 a_{23} \left[\frac{C}{P} \right]^p$$

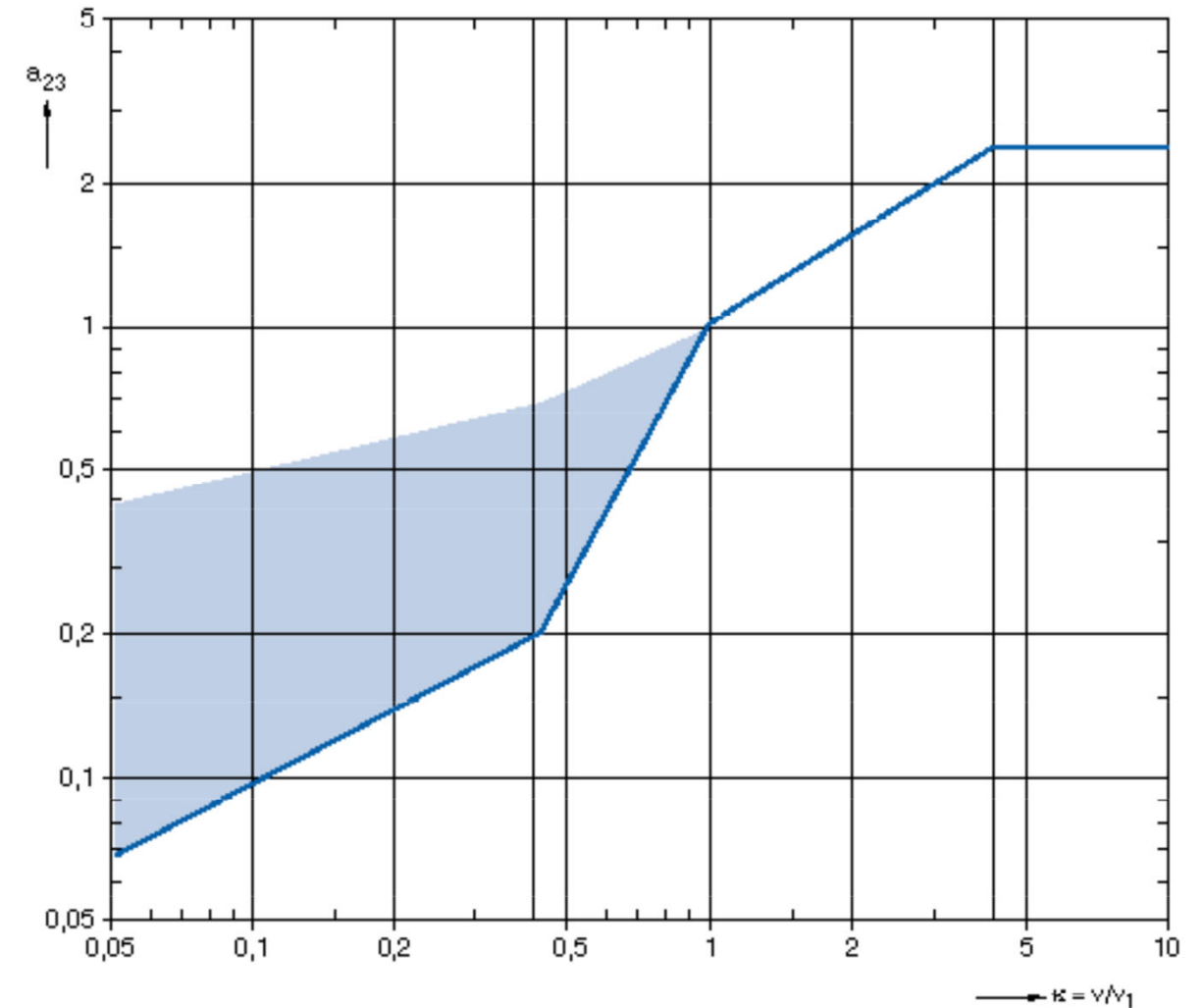
K = rapport de viscosité

ν = viscosité dynamique réelle

ν_1 = viscosité dynamique de référence

a_{23}

Diagram 1



D'après SKF

$$\kappa = \nu/\nu_1$$

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Vitesse limite : $N \cdot Dm$

| | | |
|------------|---------------------|--------------------------------|
| billes : | 600 000 - 2 500 000 | (mm . tr . min ⁻¹) |
| | 63-262 | (m/s) |
| rouleaux : | 5 - 600 000 | (mm . tr . min ⁻¹) |

Vitesse limite : $N \cdot Dm$

| | | |
|-------------------|-------------|--------------------------------|
| contact radial : | 5 - 600 000 | (mm . tr . min ⁻¹) |
| contact oblique : | 2 500 000 | (mm . tr . min ⁻¹) |

| Types de Roulement | Vitesse relative admissible | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|---|---|----|----|
| | 1 | 4 | 7 | 10 | 13 |
| Roulements à Billes à Gorge Profonde | → | → | → | → | |
| Roulements à Billes à Contact Oblique | → | → | → | → | |
| Roulements à Rouleaux Cylindriques | → | → | → | | |
| Roulements à Rouleaux Coniques | → | → | | | |
| Roulements à Rouleaux Sphériques | → | → | | | |
| Butées à Billes | → | | | | |

Selon NSK

Remarques → Lubrification à bain d'huile
--> Avec mesures spéciales pour augmenter la vitesse limite

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Capacité de **charge statique** C_0 :

charge qui donne sur les éléments roulants une pression de :

4200 MPa roulements et butées à billes

4600 MPa roulements à rotules sur billes

4000 MPa roulements et butées à rouleaux

Capacité de **charge dynamique** C :

charge constante purement radiale (roulements) ou axiale (butées) qui permet au roulement d'atteindre une durée de vie de 1 millions de tours pour 90% des roulements

C_0 et C sont donnés par les fabricants.

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Charge statique équivalente : $P_0 = X_0 Fr + Y_0 Fa$ ou $P_0 = Fr$ (la plus grande des 2)

X_0 : facteur statique radial

Y_0 : facteur statique axial

$C_0 \geq S_0 P_0$ S_0 : coefficient de sécurité

Pour une charge immobile, avec mouvement de faible amplitude ou faible vitesse de rotation < 10 tours/min

| S_0 | rlts à faibles vitesses | | rlts à l'arrêt | |
|---|----------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|
| fonctionnement | rlts à billes | rlts à rouleaux | rlts à billes | rlts à rouleaux |
| régulier sans vibrations (si silencieux) | 0,5 à 1 (2) | 1 à 1,5 (3) | 0,4 | 0,8 |
| normal (si silencieux) | 0,5 à 1 (2) | 1 à 1,5 (3,5) | 0,5 | 1 |
| chocs prononcés (si silencieux) | $\geq 1,5$ (≥ 2) | ≥ 3 (≥ 4) | ≥ 1 | ≥ 2 |

| Valeurs normalisées des coefficients X_0 et Y_0 (NF ISO 76) | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| type de roulements | | | roulement à 1 rangée | | roulement à 2 rangées | |
| | | | X_0 | Y_0 | X_0 | Y_0 |
| roulements à billes | à contact radial | | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| | à rotules | | 0,5 | $0,22.\cotan \alpha$ | 1 | $0,44.\cotan \alpha$ |
| | à contact oblique | $\alpha = 15^\circ$ | 0,5 | 0,46 | 1 | 0,92 |
| | | $\alpha = 20^\circ$ | 0,5 | 0,42 | 1 | 0,84 |
| | | $\alpha = 25^\circ$ | 0,5 | 0,38 | 1 | 0,76 |
| | | $\alpha = 30^\circ$ | 0,5 | 0,33 | 1 | 0,66 |
| | | $\alpha = 35^\circ$ | 0,5 | 0,29 | 1 | 0,58 |
| | | $\alpha = 40^\circ$ | 0,5 | 0,26 | 1 | 0,52 |
| | | $\alpha = 45^\circ$ | 0,5 | 0,22 | 1 | 0,44 |
| roulements à rouleaux | à rouleaux coniques | | 0,5 | $0,22.\cotan \alpha$ | 1 | $0,44.\cotan \alpha$ |
| | à rotules | | 0,5 | $0,22.\cotan \alpha$ | 1 | $0,44.\cotan \alpha$ |

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Charge dynamique équivalente : $P = X F_r + Y F_a$

X : facteur dynamique radial

Y : facteur dynamique axial

$$C \geq S P$$

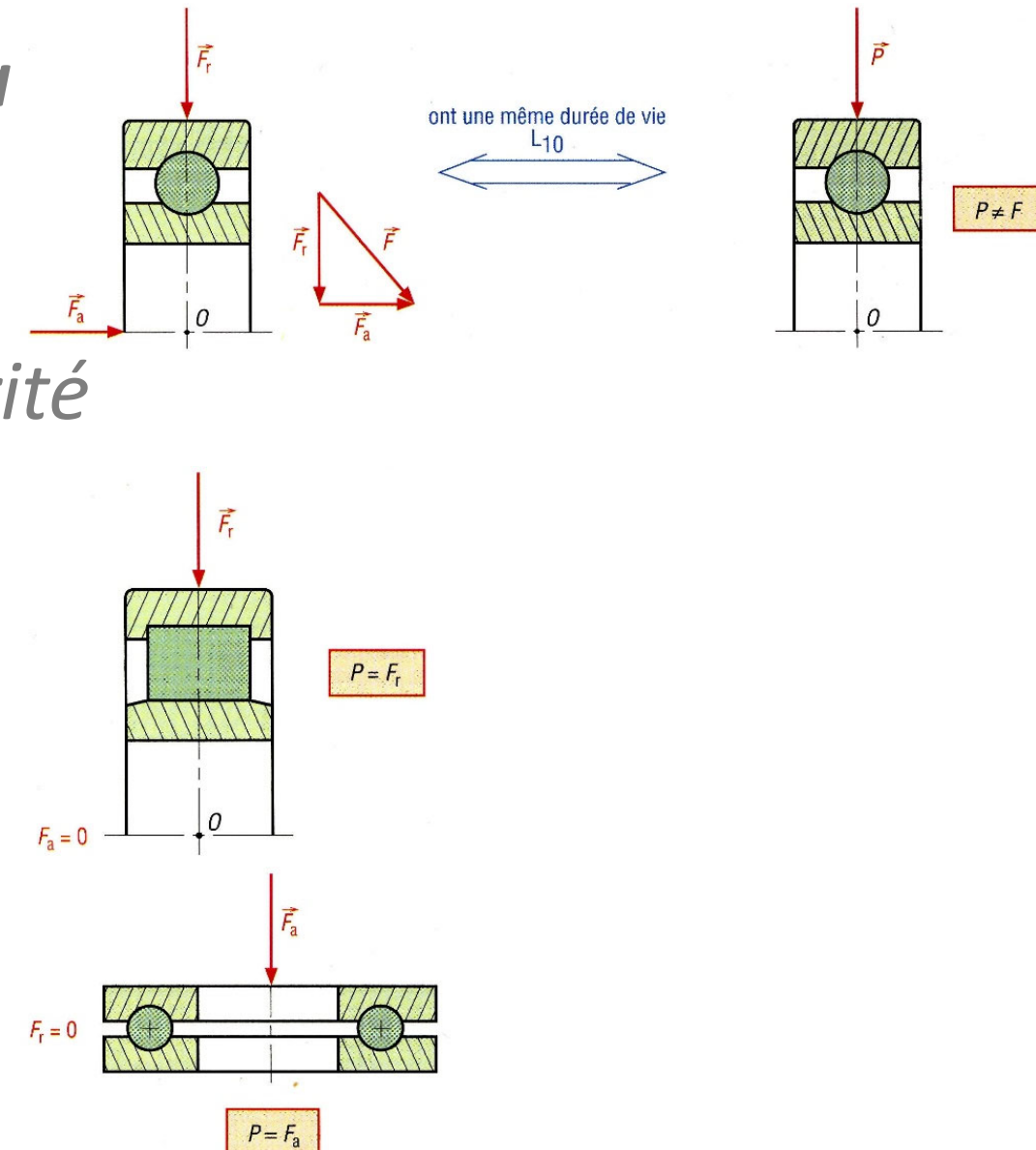
S : coefficient de sécurité

$F_a = 0$ ou F_a faible ($F_a/F_r < e$)

$$P = F_r$$

$F_r = 0$ ou F_r faible

$$P = F_a$$



Définition: durée de vie normalisée des roulements

Valeurs des coefficients X et Y suivant types de roulement

roulements rigides à billes (à contact radial)

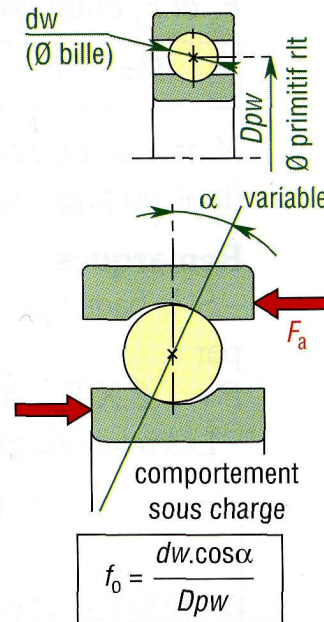
si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r$ ($X = 1$ et $Y = 0$)

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

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

| | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| $\frac{f_0.F_a^*}{C_0}$ | 0,172 | 0,345 | 0,689 | 1,03 | 1,38 | 2,07 | 3,45 | 5,17 | 6,89 |
| $\frac{F_a^{**}}{C_0}$ | 0,014 | 0,028 | 0,056 | 0,084 | 0,110 | 0,170 | 0,283 | 0,42 | 0,5 |
| X^* | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 |
| Y^* | 2,30 | 1,99 | 1,71 | 1,55 | 1,45 | 1,31 | 1,15 | 1,04 | 1,00 |
| e^* | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,38 | 0,42 | 0,44 |

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



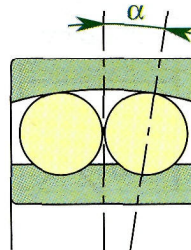
roulements à rotules sur billes

si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r + Y_1.F_a$

si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,65.F_r + Y_2.F_a$

avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,42.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,65.\cotan(\alpha) \end{cases}$

les valeurs de e , Y_1 et Y_2 sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec d , D , b et r .



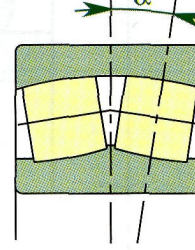
roulements à rotules sur rouleaux

si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r + Y_1.F_a$

si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,67.F_r + Y_2.F_a$

avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,45.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,67.\cotan(\alpha) \end{cases}$

les valeurs de e , Y_1 et Y_2 sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec d , D , b et r .



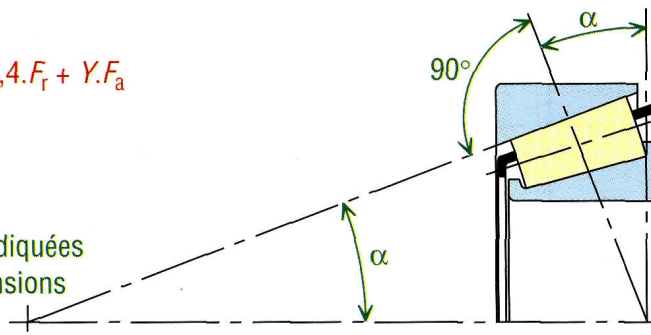
roulements à rouleaux coniques

si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r$

si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,4.F_r + Y.F_a$

avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y = 0,4.\cotan(\alpha) \end{cases}$

les valeurs de e , Y sont indiquées dans les tableaux de dimensions avec d , D , b et r .



roulements à deux rangées

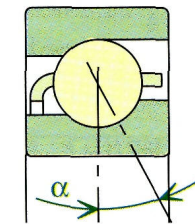
si $\frac{F_a}{F_r} \leq e : P = F_r + Y_1.F_a$

si $\frac{F_a}{F_r} > e : P = 0,67.F_r + Y_2.F_a$

avec $\begin{cases} e = 1,5.\tan(\alpha) \\ Y_1 = 0,45.\cotan(\alpha) \\ Y_2 = 0,67.\cotan(\alpha) \end{cases}$

mêmes valeurs que rotules sur billes

roulements à billes à contact oblique



roulements à une rangée et roulements en tandem (duplex T)

roulements à deux rangées et duplex en X et en O

| α degrés | e | si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ | | si $\frac{F_a}{F_r} > e$ | | si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ | | si $\frac{F_a}{F_r} > e$ | |
|--------------------|------|-----------------------------|---|--------------------------|------|-----------------------------|------|--------------------------|------|
| | | X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 20 | 0,57 | 1 | 0 | 0,43 | 1,00 | 1,0 | 1,09 | 0,70 | 1,63 |
| 25 | 0,68 | 1 | 0 | 0,41 | 0,87 | 1,0 | 0,92 | 0,67 | 1,41 |
| 30 | 0,80 | 1 | 0 | 0,39 | 0,76 | 1,0 | 0,78 | 0,63 | 1,24 |
| 35 | 0,95 | 1 | 0 | 0,37 | 0,66 | 1,0 | 0,66 | 0,60 | 1,07 |
| 40 * | 1,14 | 1 | 0 | 0,35 | 0,57 | 1,0 | 0,55 | 0,57 | 0,93 |
| 45 | 1,33 | 1 | 0 | 0,33 | 0,50 | 1,0 | 0,47 | 0,51 | 0,81 |

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

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Charge effective ou de service – Coefficient de sécurité S

| Type de fonctionnement | Coefficient |
|------------------------|-------------|
| Machine sans à coup | 1 – 1,2 |
| Machine à piston | 1,2 – 1,3 |
| Machine sous chocs | 1,5 – 3 |
| Engrenage précis | 1,05 – 1,1 |
| Engrenage ordinaire | 1,1 – 1,3 |
| Engrenage moulé | 1,6 – 2,3 |
| Courroie trapézoïdale | 2 – 2,5 |
| Courroie plate | 2,5 – 3 |

Définition: durée de vie normalisée des roulements

Durée de vie d'un ensemble de roulements:

$$L_{E10} = \left[\left(\frac{1}{(L_{1.10})} \right)^{1,5} + \left(\frac{1}{(L_{2.10})} \right)^{1,5} + \dots + \left(\frac{1}{(L_{n.10})} \right)^{1,5} \right]^{-\frac{1}{1,5}}$$

En fonction des durées de vie des n roulements sur un même arbre.

$$L_{E10} < \min(L_{i.10})$$

Exercice d'application 1:

Roulement radial :

$$d = 50$$

$$D = 110$$

$$B = 27$$

$$C = 6\,200 \text{ daN}$$

$$C_0 = 3\,800 \text{ daN}$$

Conditions de travail :

$$F_R = 1\,000 \text{ daN}$$

$$N = 1\,500 \text{ tr/min}$$

Durée de vie L_{10} ?

Durée de vie L_5 ?

| fiabilité | 90 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 99,5 | 99,9 | 99,95 |
|-----------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| L | L10 | L5 | L4 | L3 | L2 | L1 | L0,5 | L0,1 | L0,05 |
| a1 | 1 | 0,64 | 0,55 | 0,47 | 0,37 | 0,25 | 0,17 | 0,093 | 0,077 |

Exercice d'application 1:

$$L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^p = \left(\frac{6\,200}{1\,000} \right)^3 = 238 \text{ millions de tours}$$

$$\text{soit} = \frac{238 \cdot 10^6}{1\,500 \cdot 60} = 2644 \text{ heures}$$

$$L_5 = 0,64 L_{10} = 0,64 \cdot 238 = 152 \cdot 10^6$$

$$\text{soit } 1\,688 \text{ heures}$$

Exercice d'application 2:

Déterminer le roulement a contact radial:

$$F_r = 500 \text{ daN}$$

$$N = 1\,500 \text{ tr/min}$$

$$\text{Durée de vie : } L_{10} = 500 \text{ heures}$$

On cherche la charge dynamique C mini du roulement.

Exercice d'application 2:

Déterminer le roulement radial :

Fr = 500 daN

N = 1 500 tr/min

Durée de vie : L_{10} = 500 heures

$$L_{10} = 1\,500 \cdot 60 \cdot 500 = 45 \text{ millions de tours}$$

$$L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^p \qquad C = P \cdot L_{10}^{\frac{1}{p}}$$

$$C = 500 \cdot 45^{\frac{1}{3}} = 1\,778 \text{ daN}$$

Exercice d'application 2:

Roulements correspondants:

| d (mm) | D (mm) | B (mm) | C (daN) | C₀ (daN) | N maxi (tr/min) |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 17 | 62 | 17 | 2 270 | 1 080 | 12 000 |
| 20 | 72 | 19 | 2 950 | 1 550 | 10 000 |
| 25 | 62 | 17 | 2 370 | 1 220 | 12 000 |
| 30 | 62 | 16 | 1 950 | 1 130 | 10 000 |

Méthodologie de Choix d'un Roulement

1. Choisir un type de roulement en fonction de l'application
2. Calculer P_0 et P en fonction des charges réelles
3. Choisir la durée de vie désirée de l'assemblage
4. Déterminer charge statique C_0 et charge dynamique C
5. Vérifier la vitesse maximale permise
6. Adapter à l'espace disponible

Exercice 3: Vérification de la durée de vie d'un roulement

Roulement rigide à billes (radial)

Données constructeur

$$d = 30$$

$$C_0 = 8\,200 \text{ N}$$

$$D = 55$$

$$C = 12\,600 \text{ N}$$

$$B = 13$$

Données utilisation

$$Fa = 2\,200 \text{ N}$$

$$Fr = 4\,000 \text{ N}$$

$$100 \text{ tr/min}$$

On recherche la durée de vie du roulement.

Charge statique équivalente : $P_0 = Fr$ ou $P_0 = 0,6 Fr + 0,5 Fa$

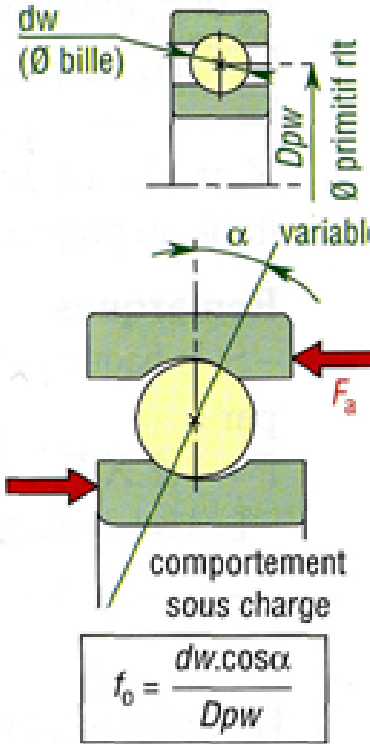
$$P_0 = 4\,000 \text{ N ou } P_0 = 0,6 \cdot 4\,000 + 0,5 \cdot 2\,200 = 3\,500 \text{ N}$$

On choisit donc: $P_0 = 4\,000 \text{ N}$

Exercice 3: Vérification de la durée de vie d'un roulement

Charge dynamique équivalente : $P = X F_r + Y F_a$

| roulements rigides à billes (à contact radial) | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| si $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ alors $P = F_r$ ($X = 1$ et $Y = 0$) si $\frac{F_a}{F_r} > e$ alors $P = 0,56.F_r + Y.F_a$ les valeurs de e et Y dépendent du rapport $\frac{f_0.F_a}{C_0}$ ou $\frac{F_a}{C_0}$ (voir ci-dessous) | | | | | | | | | |
| $\frac{f_0.F_a^*}{C_0}$ | 0,172 | 0,345 | 0,689 | 1,03 | 1,38 | 2,07 | 3,45 | 5,17 | 6,89 |
| $\frac{F_a^{**}}{C_0}$ | 0,014 | 0,028 | 0,056 | 0,084 | 0,110 | 0,170 | 0,283 | 0,42 | 0,5 |
| X^* | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 |
| Y^* | 2,30 | 1,99 | 1,71 | 1,55 | 1,45 | 1,31 | 1,15 | 1,04 | 1,00 |
| e^* | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,38 | 0,42 | 0,44 |
| * : valeurs NF ISO 281 ; ** : valeurs usuelles | | | | | | | | | |



$$F_a/C_0 = 0,27$$

$$e = 0,38$$

$$F_a/F_r = 0,55 > e$$

$$Y = 1.15$$

Exercice 3: Vérification de la durée de vie d'un roulement

Charge dynamique équivalente : $P = X F_r + Y F_a$

$$P = 0,56 \times 4\,000 + 1,15 \times 2\,200$$

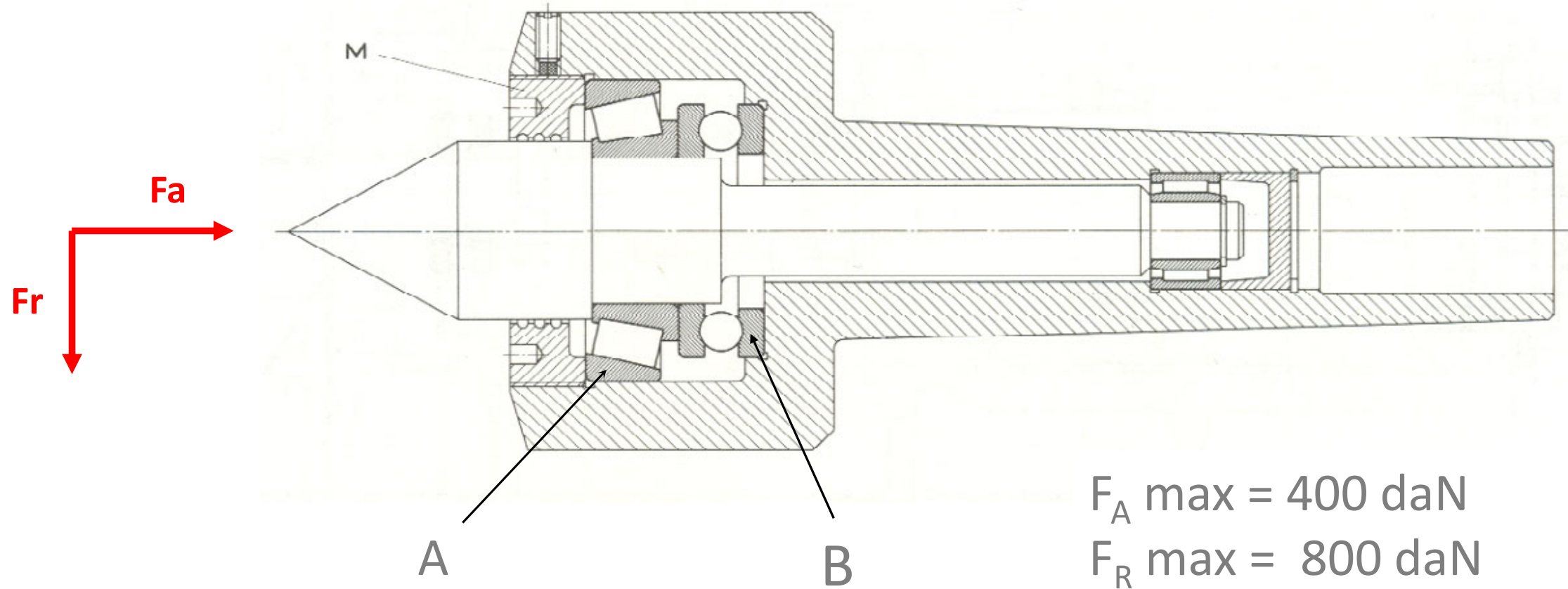


$$P = 4\,770\text{ N}$$

Durée de vie L_{10} :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p = \left(\frac{12600}{4770} \right)^3 = 18.43 \times 10^6 \text{ tours (3072h)}$$

Exercice 4: Contre-pointe de tour


$$F_A \text{ max} = 400 \text{ daN}$$
$$F_R \max = 800 \text{ daN}$$

N max = 3 000 tr/min

Exercice 4: Contre-pointe de tour

| Roulement | d (mm) | D (mm) | B (mm) | N max (tr/min) | C (daN) | C ₀ (daN) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|------------|-------------------------|
| A | 30 | 62 | 14 | 4 000 | 4 600 | 4 900 |
| B | 30 | 52 | 16 | 6 300 | 2 850 | 4 350 |

Exercice 4: Contre-pointe de tour

Butée B

$$P = F_A = 400 \text{ daN}$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p = \left(\frac{2\,850}{400} \right)^3 = 361 \cdot 10^6 \text{ tours}$$

Soit : 2 005 heures

Exercice 4: Contre-pointe de tour

Roulement A – cf Polycop P306 Précontrainte nécessaire 500 daN

$$\frac{F_A}{F_R} = \frac{500}{800} = 0,625 > 0,37 \quad P = X \cdot F_R + Y \cdot F_A = 0,4 \cdot F_R + Y \cdot F_A$$
$$P = 0,4 \times 800 + 1,6 \times 500 = 1120 \text{ daN}$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^{\frac{10}{3}} = \left(\frac{4\,600}{1120} \right)^{\frac{10}{3}} = 69 \cdot 10^6 \text{ tours}$$

Soit : 383 heures

Exercice 4: Contre-pointe de tour

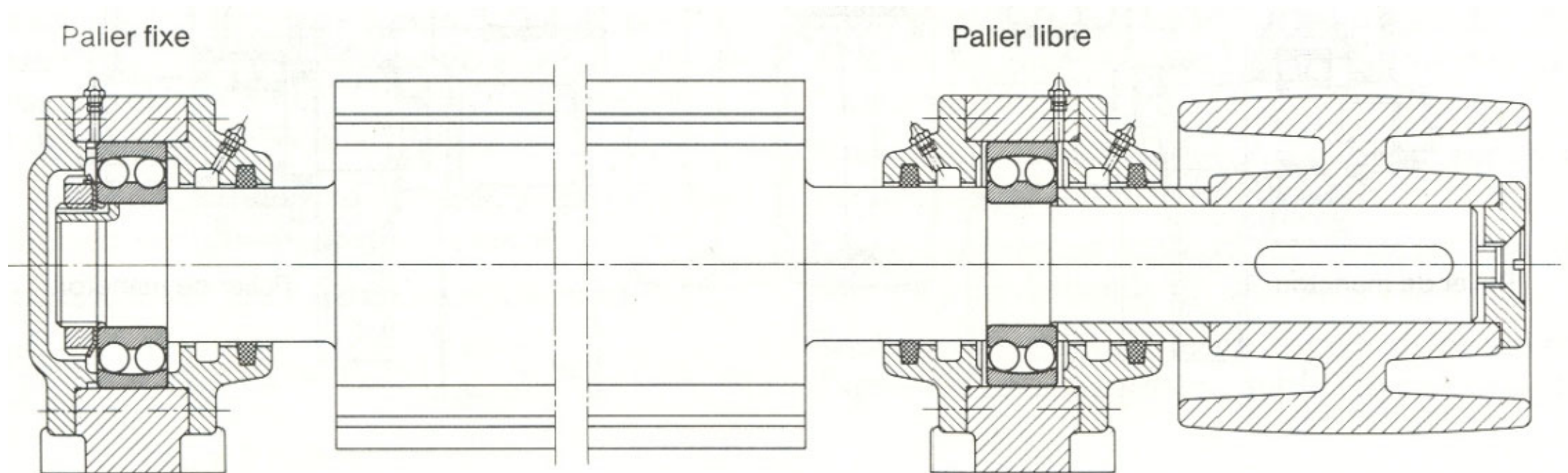
Butée B

$$P = F_A + \text{précontrainte} = 900 \text{ daN}$$

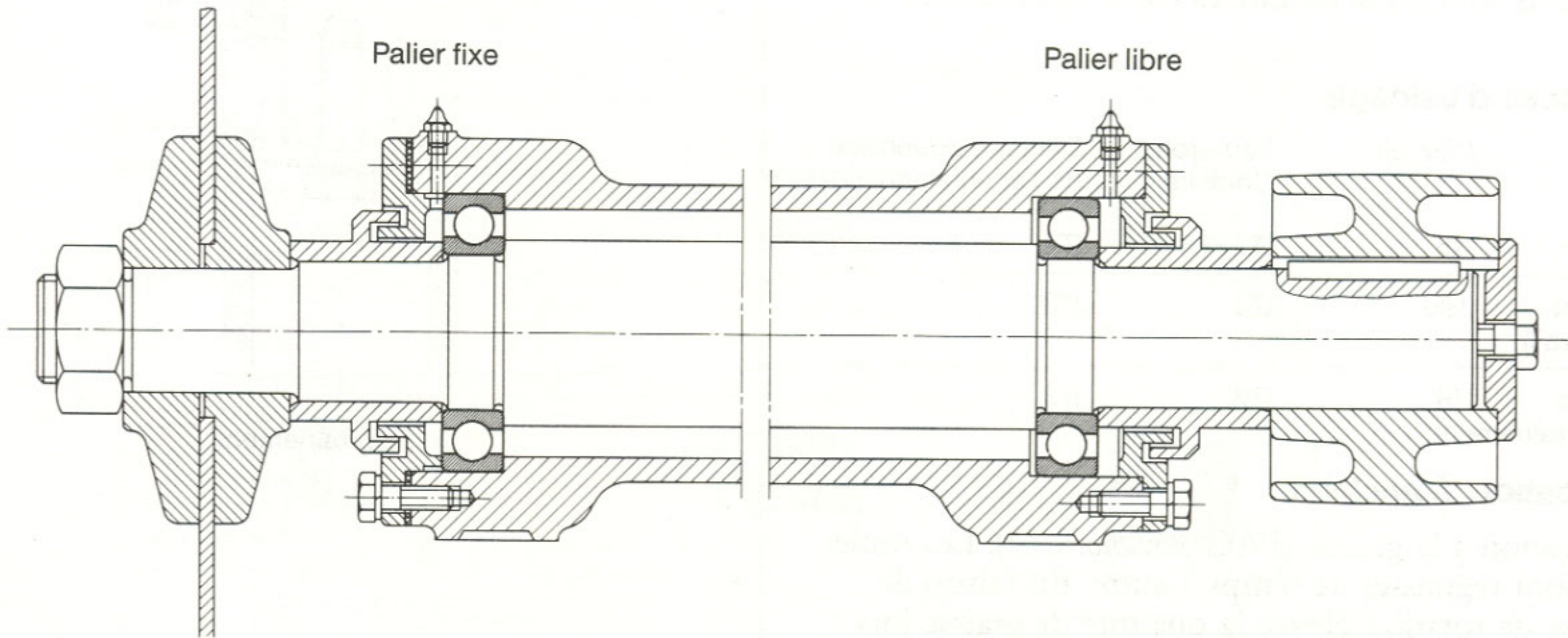
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p = \left(\frac{2\,850}{900} \right)^3 = 32 \cdot 10^6 \text{ tours}$$

Soit : 177 heures

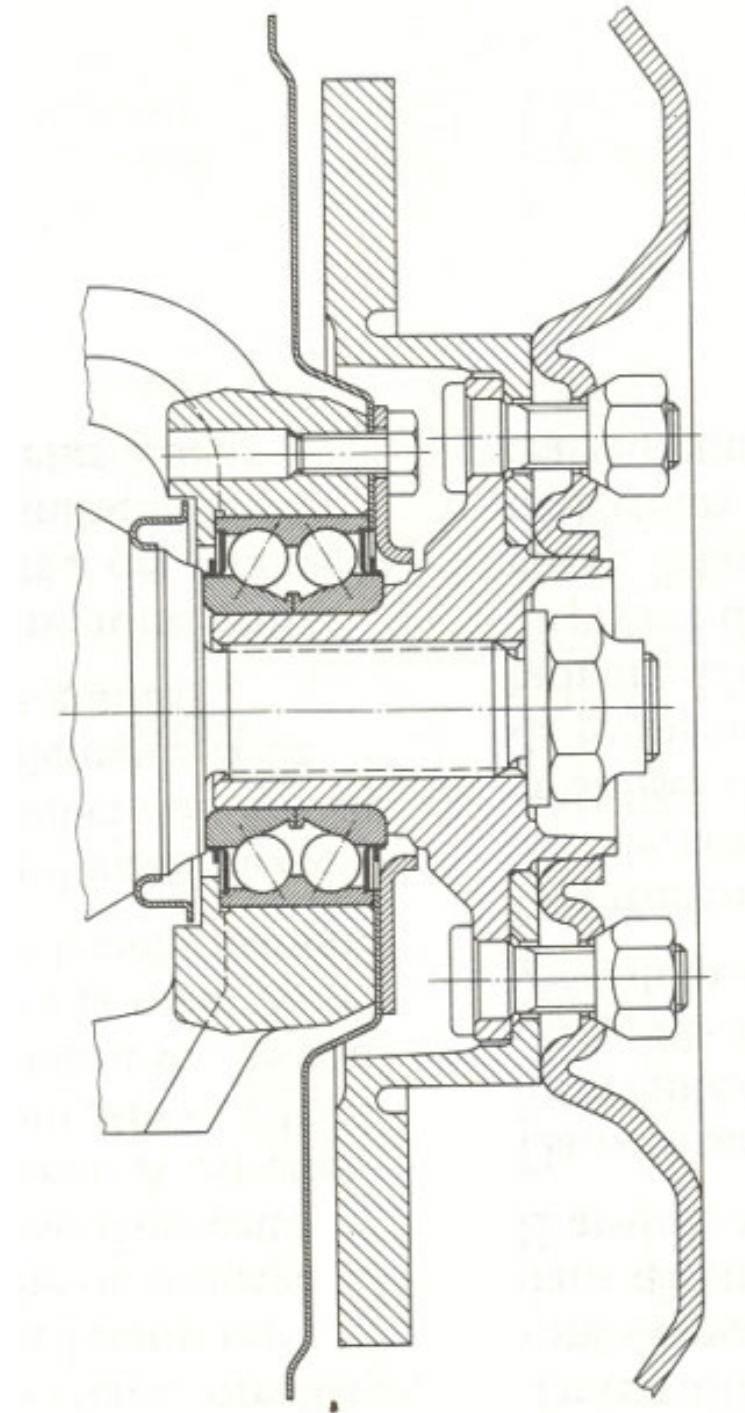
Exemples – Arbre porte-lames d'une raboteuse



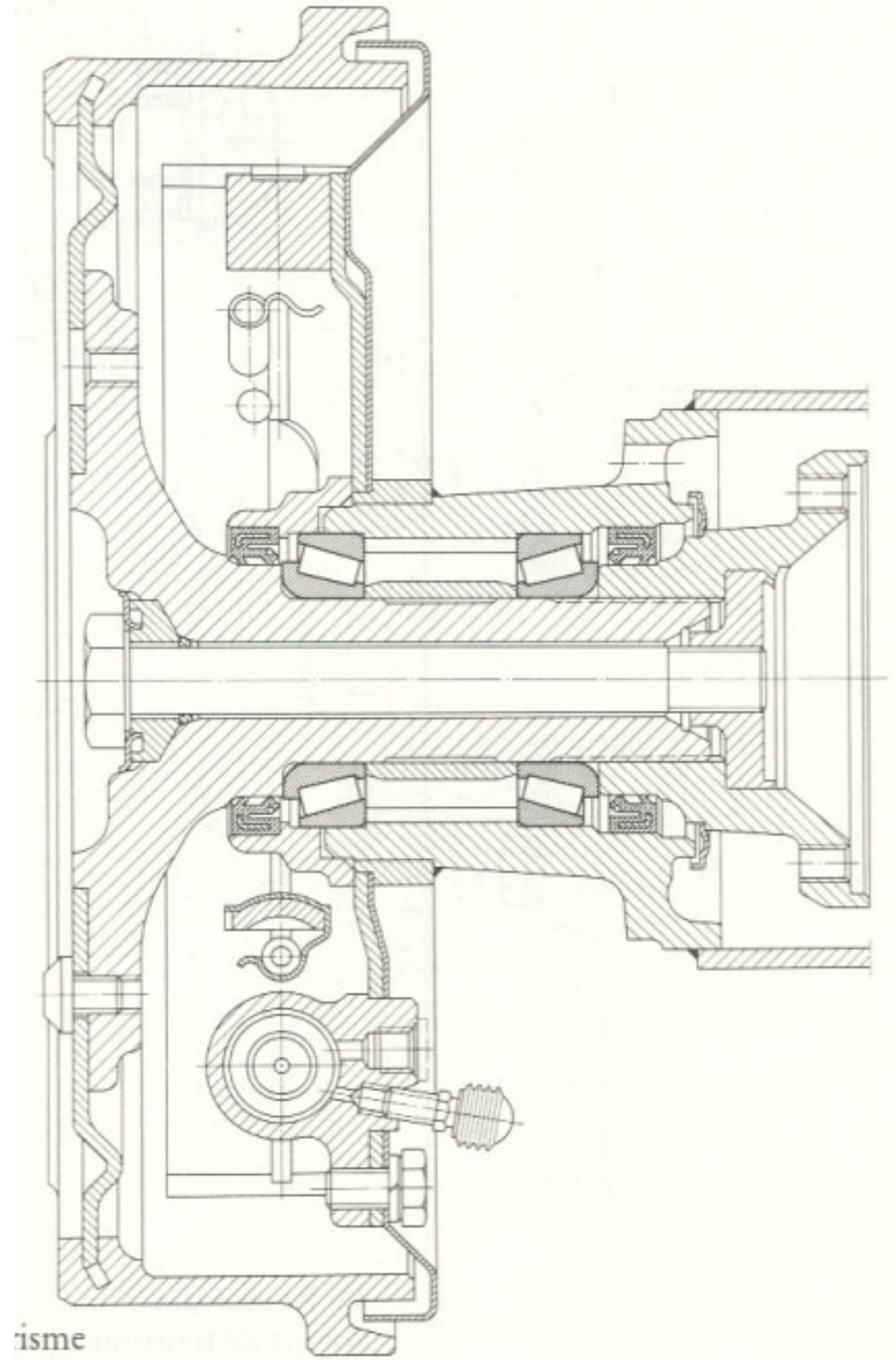
Exemples – Arbre de scie circulaire



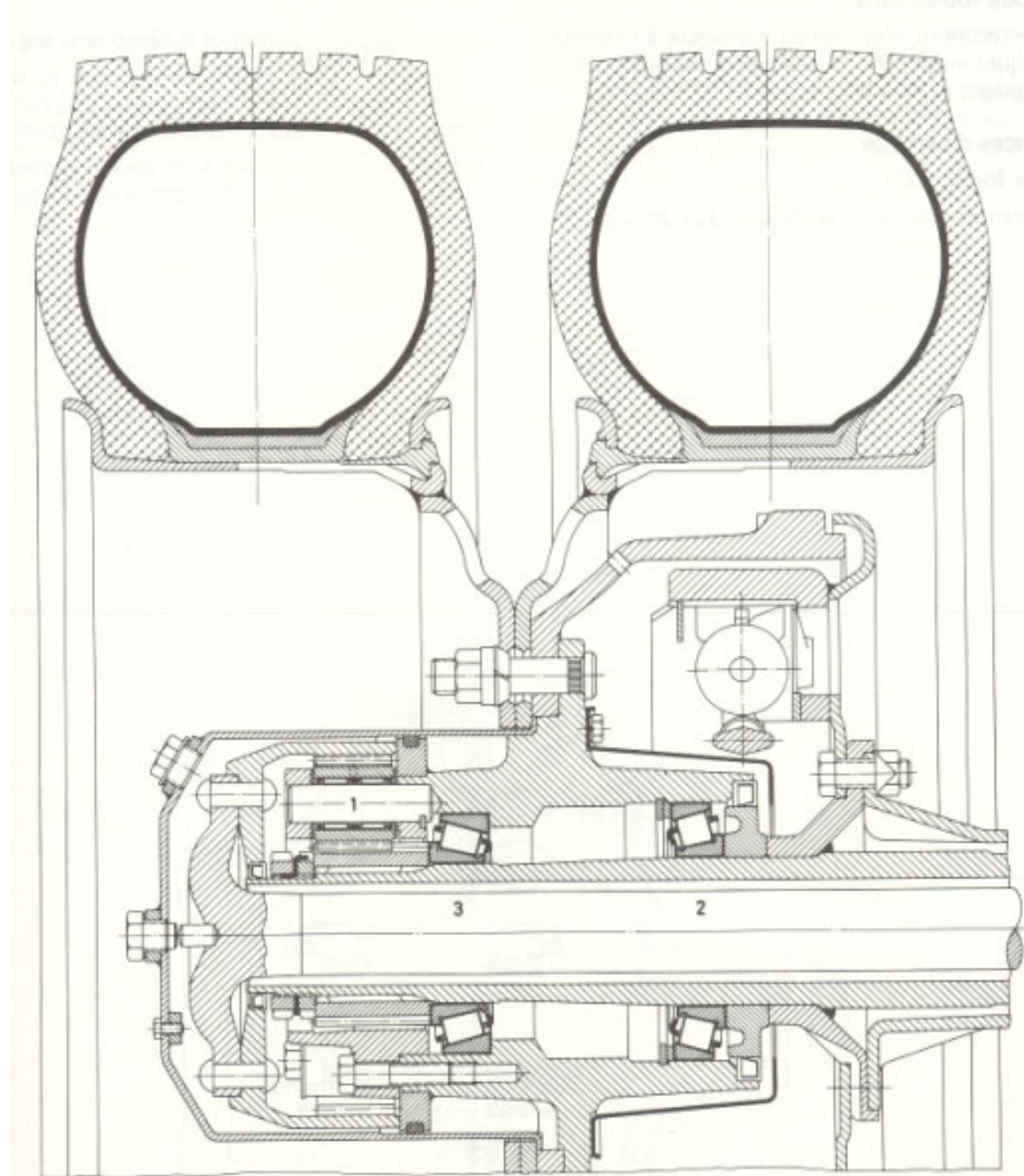
Exemples – Roue avant de voiture



Exemples – Roue avant de voiture



Exemples –
Roue arrière de camion
Propulsion



Exercice 5: Choix et détermination d'un roulement

Déterminer le roulement rigide à billes :

$F_r = 4\,750\text{ N}$; $F_a = 1\,450\text{ N}$; $10\,000\text{ h}$; $2\,500\text{ tr/min}$

Démarche :

$$F_a/F_r = 1\,450/4\,750 = 0,30$$

D'après tableau fournisseur :

$$\text{si } F_a/F_r < e \quad \longrightarrow \quad X = 1 ; Y = 0 \quad \longrightarrow \quad P = F_r$$

$$\text{si } F_a/F_r > e \quad \longrightarrow \quad X = 0,56 ; Y = ? \quad \longrightarrow \quad P = X F_r + Y F_a$$

Problème : C_0 ? \longrightarrow Hypothèse de départ

Exercice 5: Choix et détermination d'un roulement

Hypothèse 1 : $P = Fr = 4\,750\text{ N}$

$$L_{10} = 10\,000 \times 60 \times 2\,500 = 1\,500 \text{ millions de tours}$$

$$\frac{C}{P} = \left(L_{10}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(1\,500\right)^{\frac{1}{3}} = 11,5$$

$$C = 11,5 \cdot 4\,750 = 54\,700\text{ N}$$

Tableau fournisseur : $d = 35$; $D = 100$; $B = 25$



$$C = 55\,000\text{ N} ; C_0 = 31\,000\text{ N}$$

Exercice 5: Choix et détermination d'un roulement

Vérification hypothèse 1 : $P = Fr = 4\,750\text{ N}$

$$Fa/C_0 = 1\,450/31\,000 = 0,047 \longrightarrow e = 0,25 \longrightarrow Y = 1,92$$

$$Fa/Fr = 0,30 > e \longrightarrow \text{Hypothèse 1 fausse}$$

$$\longrightarrow P = X Fa + Y Fr$$

Exercice 5: Choix et détermination d'un roulement

Hypothèse 2 : $P = X F_a + Y F_r ; Y = 2$

$$P = X F_r + Y F_a = 0,56 \cdot 4\,750 + 2 \cdot 1\,450 = 5\,560 \text{ N}$$

$$C = 11,5 P = 11,5 \cdot 5\,560 = 69\,500 \text{ N}$$

Catalogue fournisseur : $d = 45$; $D = 120$; $B = 29$; $C = 77\,000 \text{ N}$; $C_0 = 45\,000 \text{ N}$

Exercice 5: Choix et détermination d'un roulement

Hypothèse 2 : $P = X Fa + Y Fr ; Y = 2$

$$Fa/C_0 = 1\,450/45\,000 = 0,032 \longrightarrow e = 0,23 \longrightarrow Y = 1,95$$

$$Fa/Fr = 0,30 > e \longrightarrow \text{Hypothèse bonne, } P = X Fa + Y Fr$$

$$P = X Fr + Y Fa = 0,56 \cdot 4\,750 + 1,95 \cdot 1\,450 = 5\,490 \text{ N}$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p = \left(\frac{77\,000}{5\,490} \right)^3 = 2750 \cdot 10^6 \text{ tours}$$

Le roulement convient : durée de vie souhaitée = $1\,500 \cdot 10^6$ tours

Recirculating Ball Bearings vs. DryLin® Plastic Sliding Bearings



Recirculating Ball Bearing

- + Low coefficient of friction
- + Low clearance
- + High dynamic load
- Costs
- Vibration-dampening
- Lubrication
- Noise
- Hardened shafting necessary



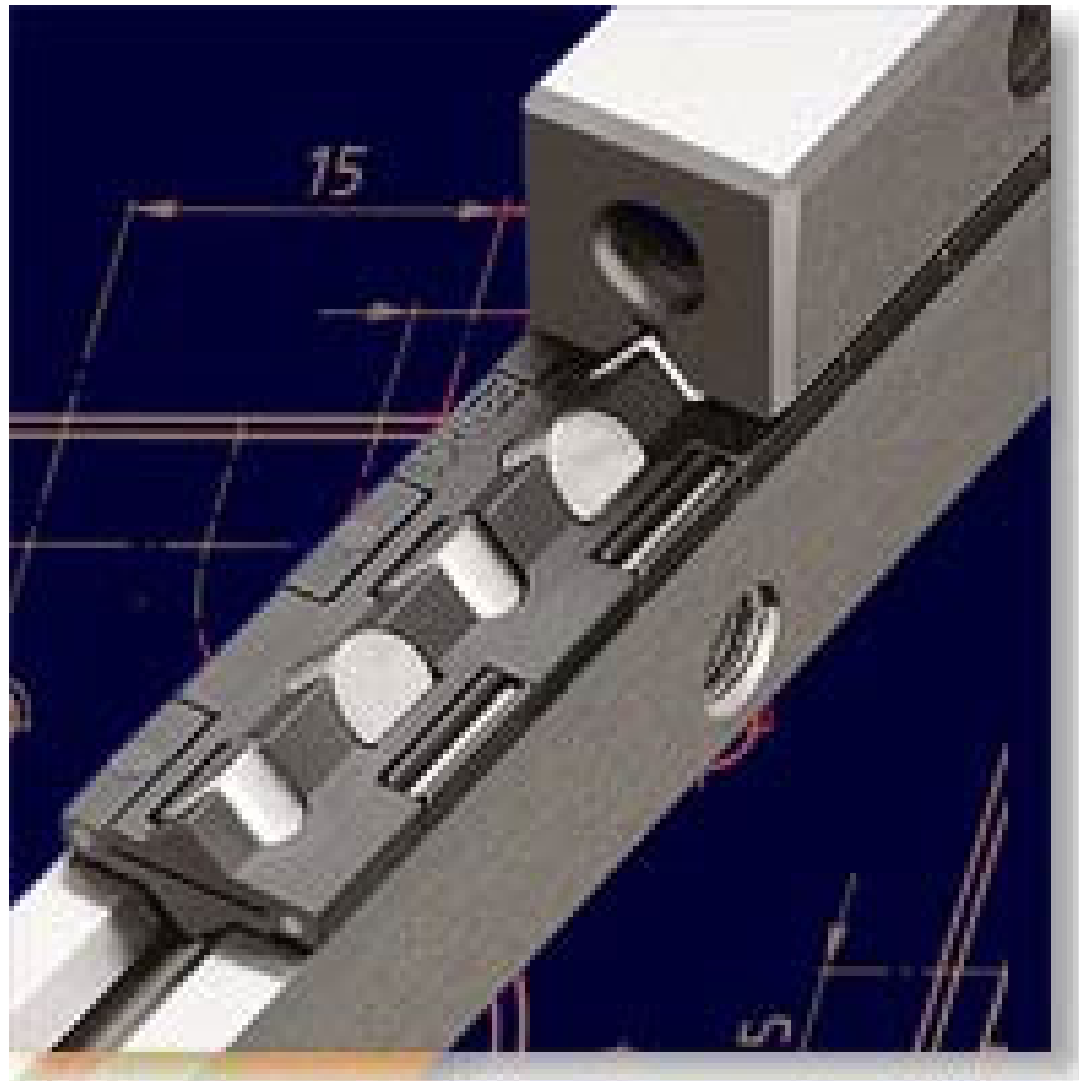
Engineered Plastic Bearing

- + Self-lubricating / no oil needed
- + Resistant to dirt
- + Vibration-dampening
- + High static load
- + Linear and rotating possible
- + Low weight / height
- + Cost effective
- + Soft shafts
- High coefficient of friction
- Higher clearance

Sliding vs. Rolling: Benefits of Plastic Linear Bearings

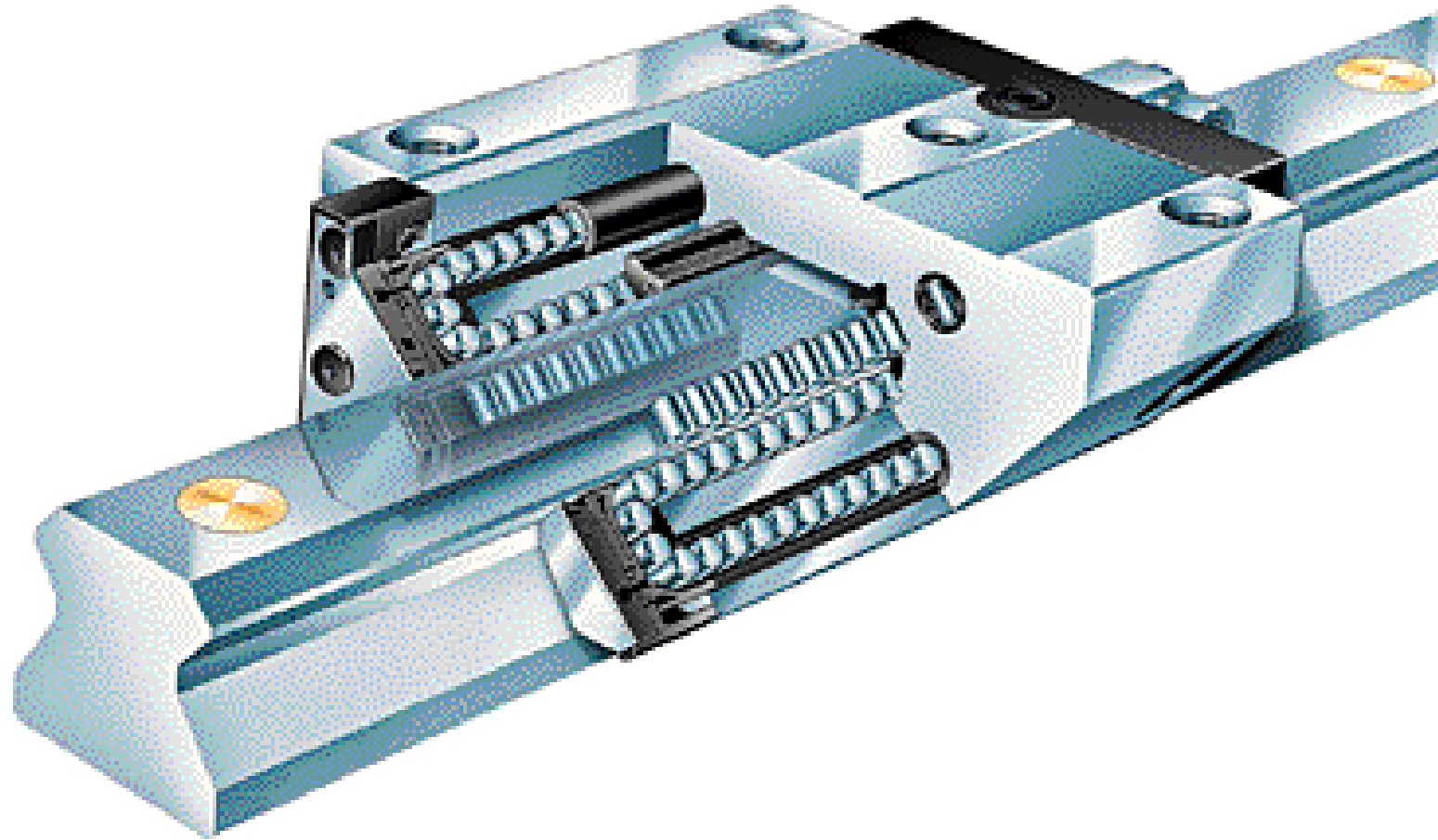


Glissière à roulement: Rail de guidage à course limitée



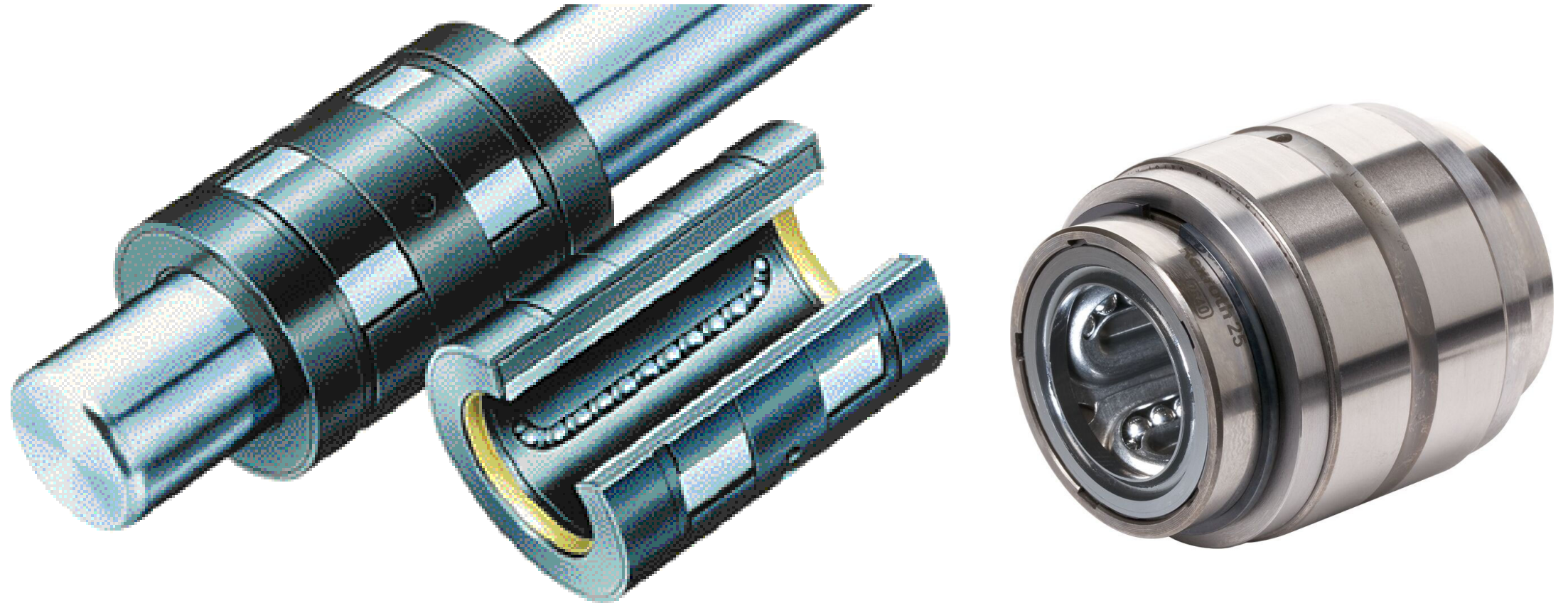
Patin à rouleaux (doc Schneeberger)

Glissière à roulement: Rail de guidage à course illimitée



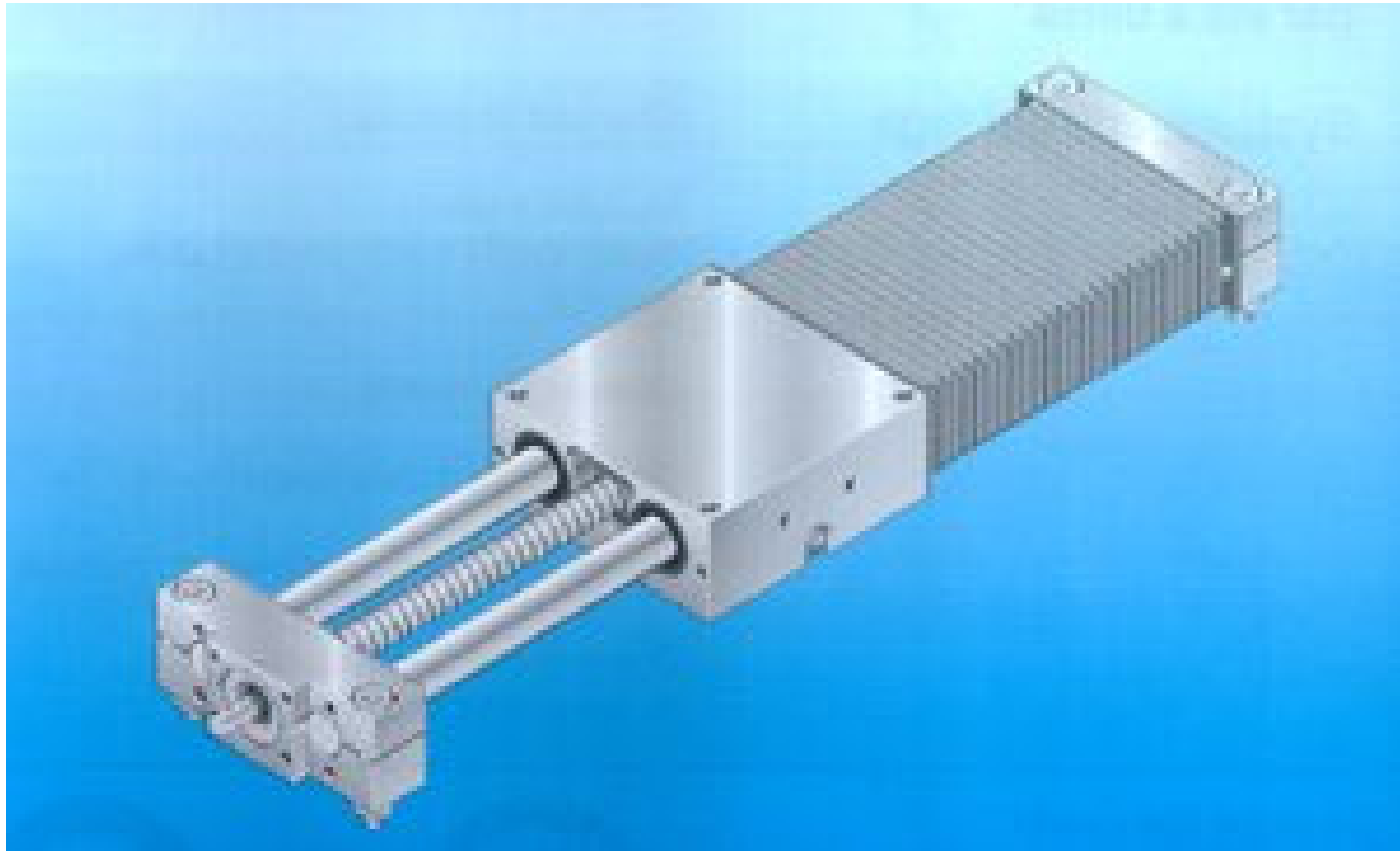
Guidage linéaire à recyclage (doc INA)

Pivot glissant à roulement: Rail de guidage à course illimitée



Douille à billes (doc INA)

Glissière a roulement: Rail de guidage à course illimitée



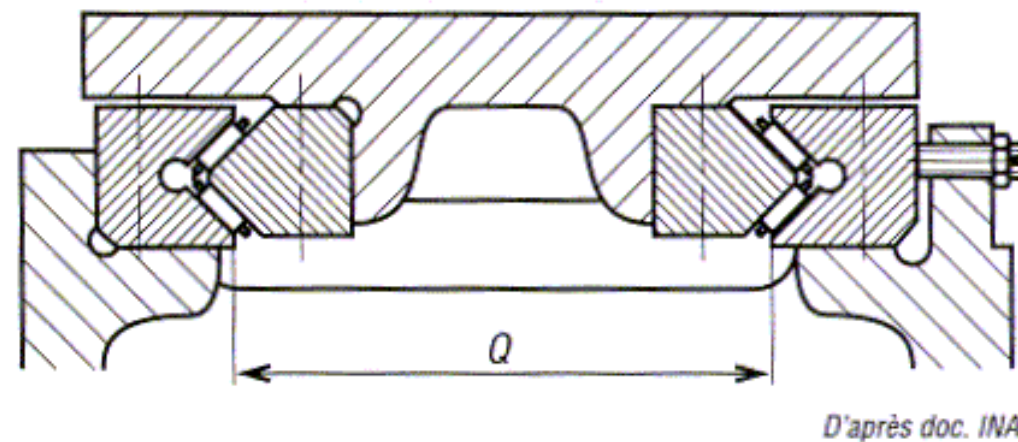
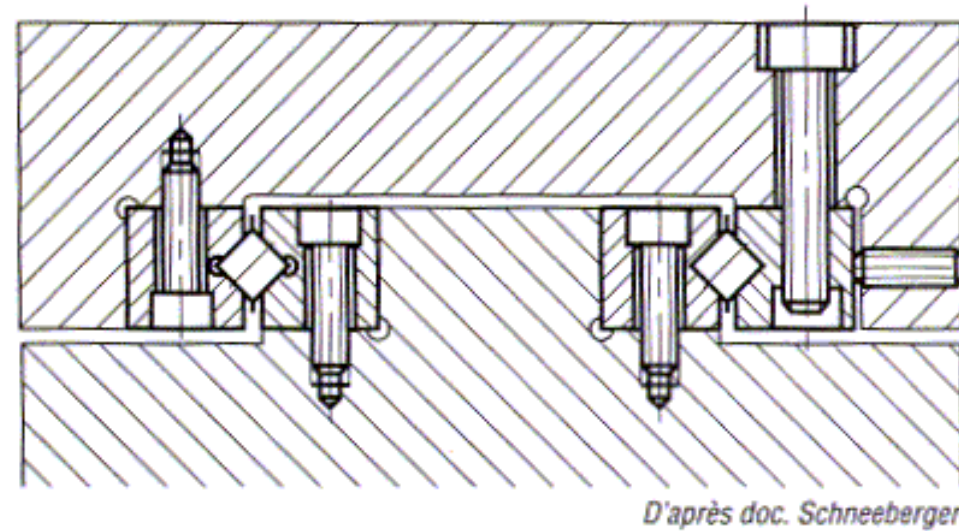
Glissière avec 2 douilles à billes (doc ALME)

Glissière a roulement: Rail de guidage à course illimitée



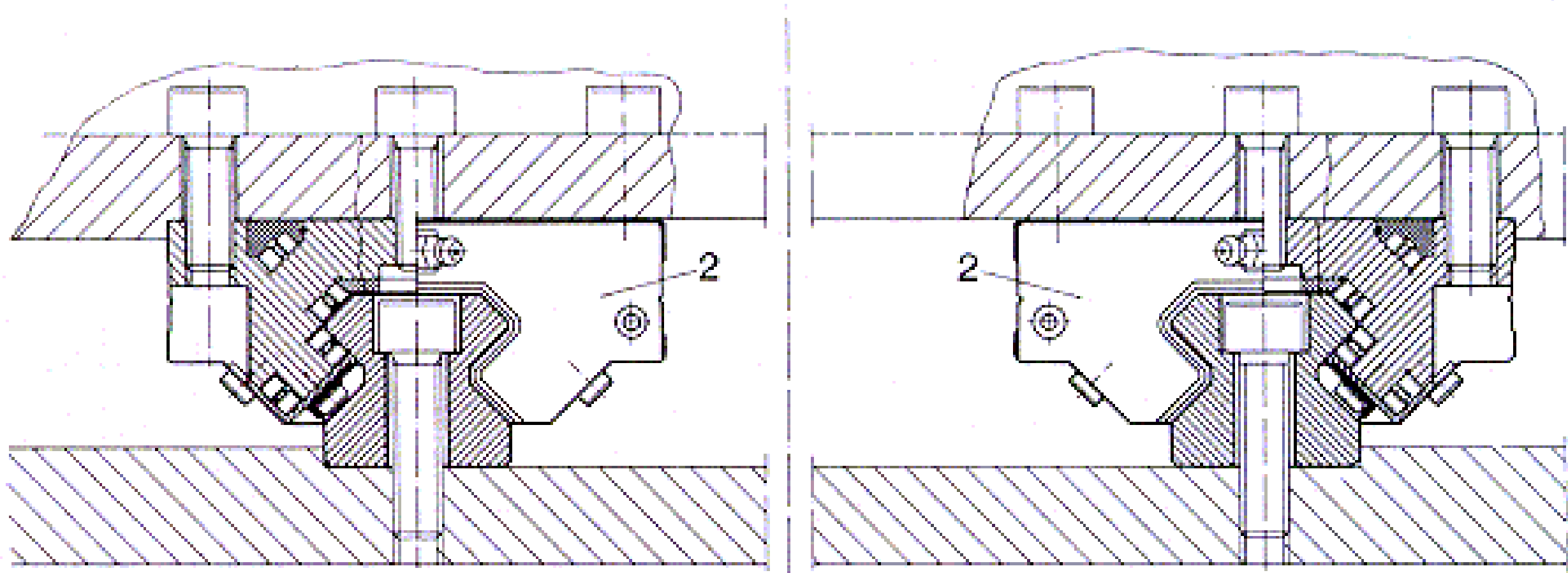
Rails en V (doc NADELLA, ALME, HEPCO)

Glissière a roulement: Rail de guidage à course illimitée



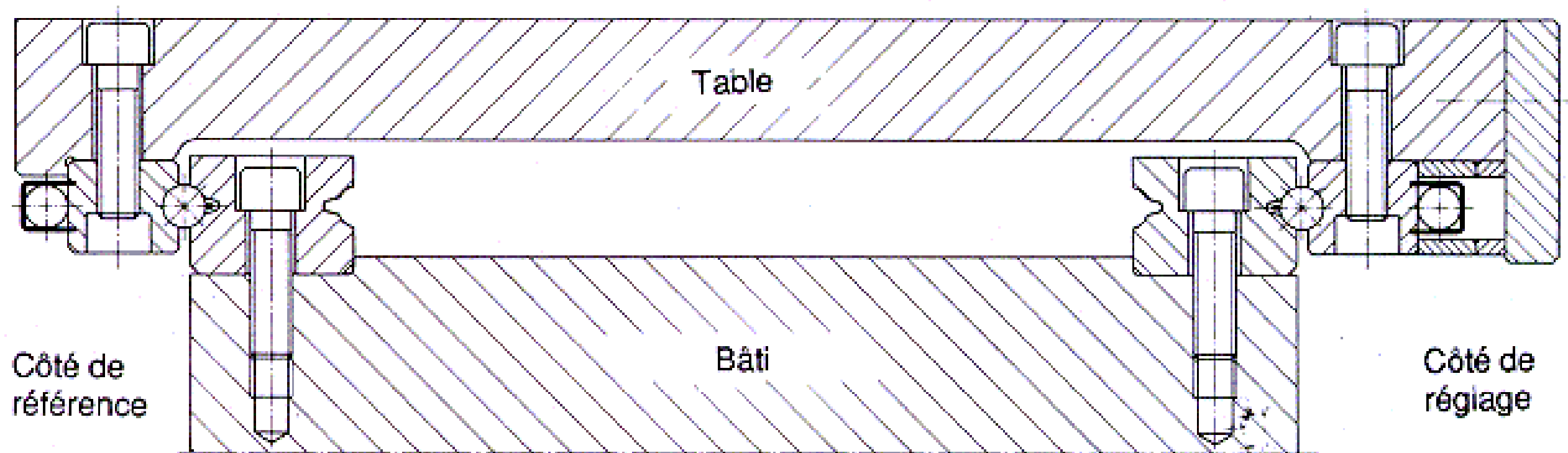
Guidage réalisé à partir d'éléments roulants

Glissière a roulement: Rail de guidage à course illimitée



Guidage réalisé à partir d'éléments roulants

Glissière a roulement: Rail de guidage à course illimitée



Guidage réalisé à partir d'éléments roulants

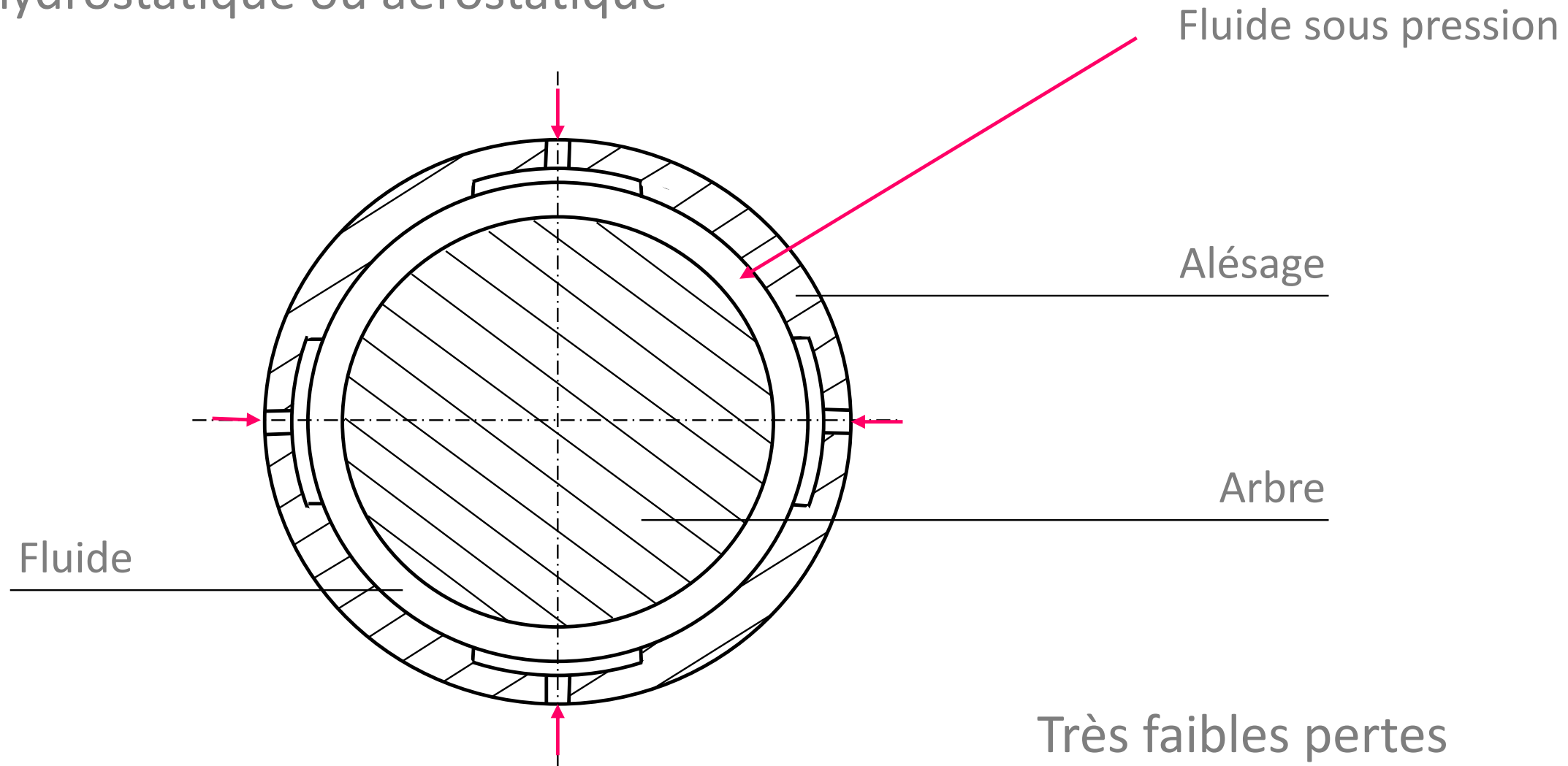
Glissière a roulement: dimensionnement

$$L = a \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{pour } 10^5 \text{ m}$$

a = coefficient de fiabilité (a = 1 pour une fiabilité de 90%)

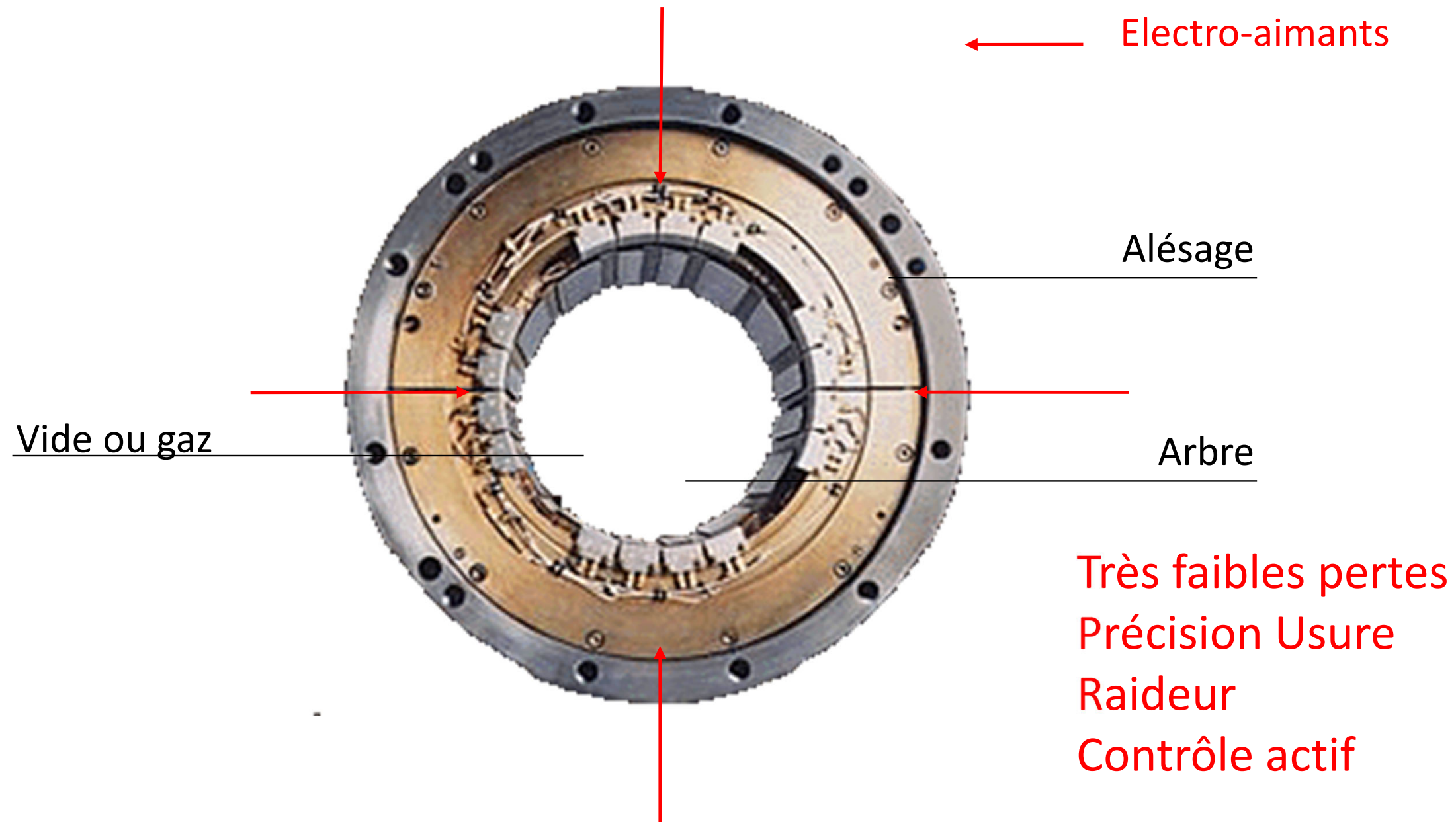
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{pour } 10^5 \text{ m}$$

Palier hydrostatique ou aérostatique



Très faibles pertes
Précision Usure
Raideur (viscosité)

Palier magnétique





Ball Bearing



Roller Bearing



Linear Bearing



Fluid Bearings



Magnetic Bearing



Plain Bearings