

# Cycle 7: Conception des ensembles mécaniques

## Chapitre 1 : Guidage en rotation – paliers lisses



Articulations d'une prothèse de main [1]



Articulations d'une table élévatrice [2]



Paliers d'une pompe turbomoléculaire [3]

Comme de nombreux systèmes en témoignent, les liaisons possédant un degré de liberté en rotation sont nombreuses dans les systèmes que nous rencontrons. Ces liaisons permettent aux solides de pivoter les uns par rapport aux autres, ce qui est par exemple le cas dans les moteurs, dans les réducteurs... Ces liaisons sont aussi présentes dans les systèmes articulés.

Dans le cadre du programme de PTSI, nous nous intéressons à la conception des liaisons pivots par contact direct ou par paliers lisses. Les solutions utilisant des roulements seront abordées en PT.

Problématique

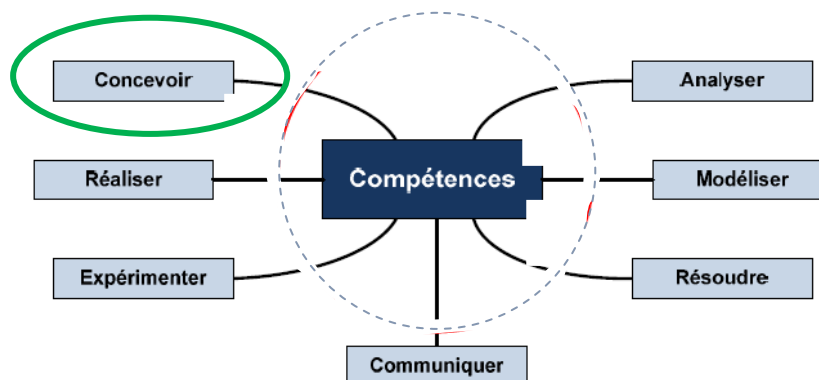
PROBLÉMATIQUE :

- Comment décrire une solution pivot existante ?
- Comment concevoir une architecture de liaison pivot ?
- Comment dimensionner une liaison pivot ?
- Quels éléments technologiques utiliser ?

Savoir

SAVOIRS :

- Identifier les architectures des guidages en rotation
- Définir et caractériser les fonctions techniques
- Définir les principes de réalisations
- Définir les principales solutions de guidage en rotation avec glissement



# Sommaire

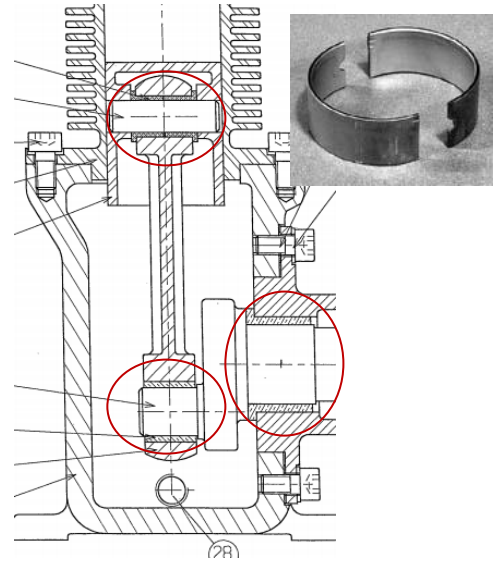
1. <u>Introduction</u>	3
2. <u>Guidage en rotation autour d'un axe : PIVOT</u>	3
3. <u>Les différentes solutions pour un guidage en rotation</u>	4
4. <u>Notions sur le frottement de glissement et la lubrification</u>	5
5. <u>Les principaux paliers lisses</u>	5
6. <u>Etude cinématique d'un palier lisse</u>	6
7. <u>Comportement STATIQUE d'un palier lisse soumis à une charge radiale centrée</u>	7
8. <u>Comportement DYNAMIQUE d'un palier lisse</u>	9
9. <u>Valeurs de <math>P_{admissible}</math> et <math>pV_{admissible}</math></u>	10
10. <u>Montage et ajustements</u>	12

### 1. Introduction

Dans les mécanismes, les **guidages en rotation avec paliers lisses** sont encore **très utilisés**, même si les liaisons à roulements présentent de nombreux avantages.

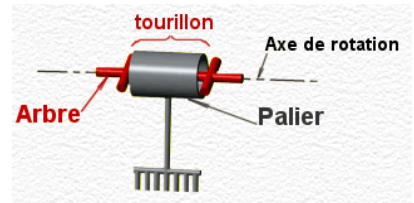
3 avantages des paliers lisses :

- **Faible prix** avec performances ordinaires (charges et vitesses),
- **Performances remarquables** des liaisons haut de gamme (ex : liaison maneton/bielle dans le moteur !!)
- **Faible encombrement** radial



### 2. Guidage en rotation autour d'un axe : PIVOT

Le guidage en rotation autour d'un arbre est assuré par une **liaison PIVOT**. Elle ne laisse subsister entre l'arbre et son palier qu'une liberté de rotation autour d'un axe géométrique: **l'axe de rotation**. Si de plus l'arbre peut glisser dans son palier suivant cet axe, la liaison est alors une **liaison pivot glissant**.

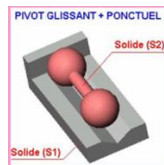


Nom de la liaison	Représentations planes	Perspective	Degrés de liberté	Actions de liaison	mobilités
Liaison pivot de centre A et d'axe X			Translation Rotation 0 Rx 0 0 0 0	Résultantes Moments X 0 Y M Z N	
Liaison Pivot Glissant de centre C et d'axe X			Translation Rotation Tx Rx 0 0 0 0	Résultantes Moments 0 0 Y M Z N	

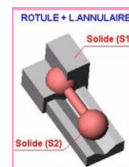
Les surfaces géométriques associées :

L'obtention d'une liaison pivot par combinaison de 2 liaisons simples a été étudié en cours, TD et TP. Nous avons obtenu les solutions isostatiques suivantes :

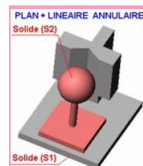
- **Pivot glissant (centrage long) + appui ponctuel**



- **Rotule + linéaire annulaire (montage classique roulements)**



- **Linéaire annulaire (centrage court) + appui plan**



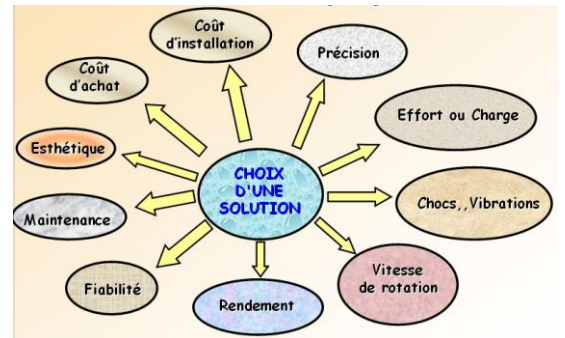
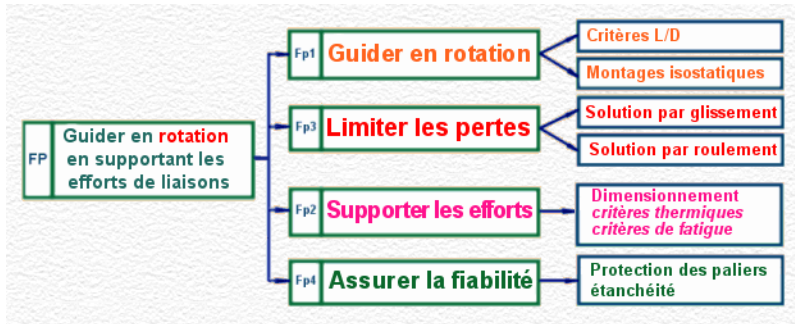
Le choix entre les différentes solutions dépend des **valeurs des efforts Fa, Fr et couple à transmettre** entre les solides.



Conception des ensembles mécaniques: guidage en rotation par paliers lisses

FONCTIONS assurées par une liaison pivot :

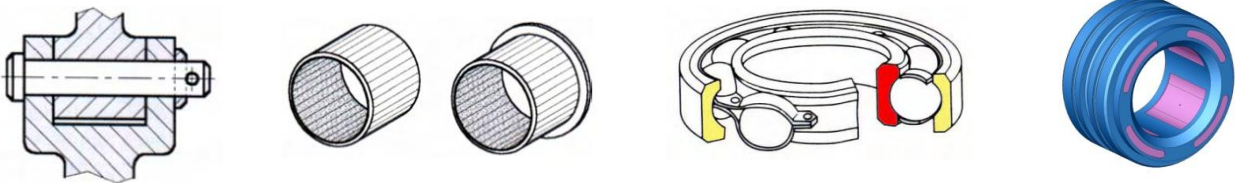
Voici les fonctions principales assurées par une liaison pivot, ainsi que les **critères de choix pour la solution** technique.



3. Les différentes solutions pour un guidage en rotation

Il existe **4 solutions principales** permettant de réaliser guidage en rotation :

- par **contact direct**
- par interposition d'une **bague de frottement (palier lisse)**
- par interposition **d'éléments roulants**
- par interposition **d'un film d'huile**
- par **palier fluide**



Type de guidage	Précision	Vitesse rotation	Efforts transmettre	Frottement	Coût réalisation liaison	Sensibilité pollution
Contact direct	-	--	-	---	+++	-
Palier lisse	+	+	++	+	+	-
Roulement	++	++	+++	+++	-	--
Film d'huile	+++	+++	+++	+++	--	--

Dans ce chapitre, nous allons traiter des guidages en **rotation par glissement avec paliers LISSES**.

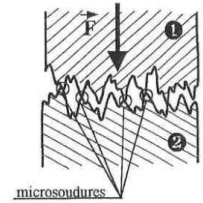




4. Notions sur le frottement de glissement et la lubrification

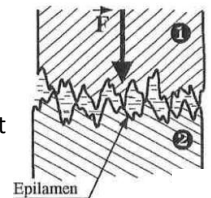
Frottement SEC :

Le **frottement de glissement** est l'effort résistant au déplacement relatif qui se crée entre les surfaces en contact. Frottement et usure dépendent des conditions de ruptures des microsoudures de contact.



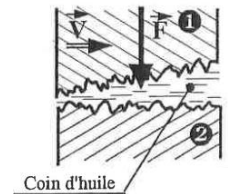
Frottement ONCTUEUX:

Le rôle d'un lubrifiant ici est de créer dans l'interface un film diminuant le frottement et atténuant l'usure. La charge est transmise par les contacts et le lubrifiant. Les propriétés du lubrifiant sont : **VISCOSITE** (frottement interne) et **ONCTUOSITE** (aptitude à adhérer aux surfaces).



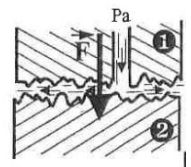
Frottement HYDRODYNAMIQUE

Il n'y a **plus contact direct**. La permanence du film d'huile est assurée par le déplacement relatif des 2 solides. La stabilité du film dépend de l'état de surface, jeu, métaux, lubrifiant...



Frottement HYDROSTATIQUE

En l'absence de mouvement, la permanence du film d'huile est assurée par **une pompe**.



5. Les principaux paliers lisses

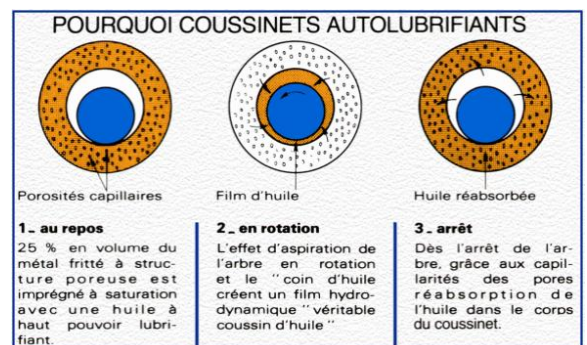


Economiques, souvent utilisés, les **coussinets** sont des bagues cylindriques, de forme tubulaire, avec ou sans collerette, interposés entre un arbre et son logement pour faciliter le mouvement de rotation en limitant les pertes par frottement.

Construits à partir de matériaux présentant de bonnes qualités frottantes (**bronze, étain, plomb, graphite, Téflon, PTFE, polyamide**), ils peuvent être utilisés à sec ou avec lubrification.

Les coussinets auto lubrifiants :

Ils sont fabriqués à partir de **métal fritté** à base de bronze, poreux (porosités entre 15 et 35% en volume), **avec incorporation de lubrifiant** (huile, graphite...) dans les porosités. Dans le cas de l'huile, la structure, comparable à une éponge, restitue l'huile en fonctionnement et l'absorbe à l'arrêt

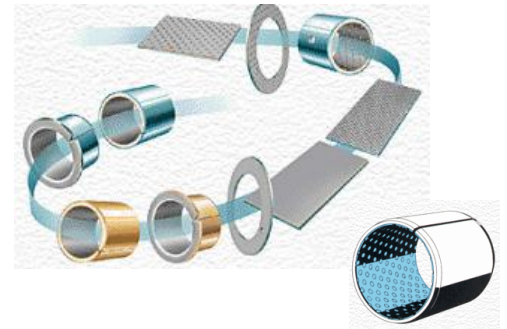




Conception des ensembles mécaniques: guidage en rotation par paliers lisses

Les coussinets composites de type « glacier » GLYCODUR

Ils **peuvent fonctionner à sec** ou avec un léger graissage au montage sous des vitesses périphériques inférieures à 3 m/s. Ils sont constitués de 3 couches différentes. La base est une tôle d'acier roulée recouverte d'une couche de bronze fritté. La surface frottante peut être en résine acétal ou **en PTFE** avec addition d'un lubrifiant solide: plomb, graphite, bisulfure de molybdène MoS<sub>2</sub>.



Les coussinets polymères (nylon, PTFE, acétal)

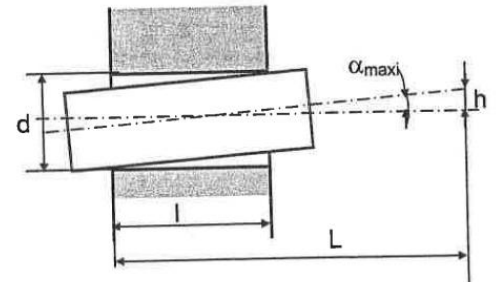


Surtout utilisés lorsqu'il est nécessaire d'avoir une **grande résistance chimique** (acides, bases...). **Inconvénients**: le **fluage sous charge** et un **faible coefficient de conductivité thermique** empêchant une bonne évacuation des calories.

6. Etude cinématique d'un palier lisse (architecture montage)

Le critère cinématique pour un palier lisse est la **précision du guidage** qui dépend **du jeu radial  $j$  ( $j=D-d$ )** et **imprécision angulaire  $\alpha$** .

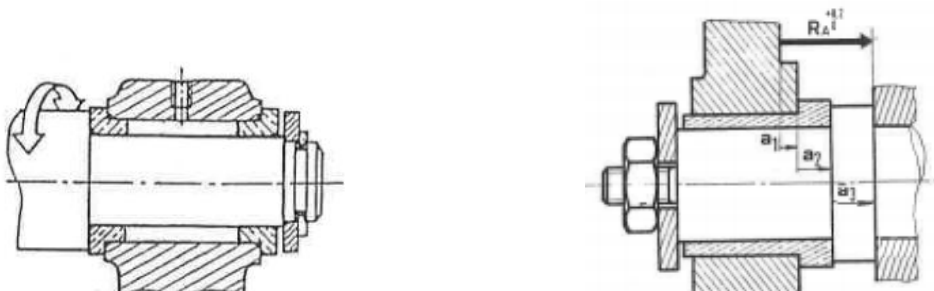
- **si jeu trop faible** : rupture film huile, grippage, linéaire annulaire devient un encastrement
- **si jeu trop grand** : guidage peu précis, contact sur une génératrice



Nous pouvons retenir comme ordre de grandeur d'architecture de montage:

Si  $l < 0.5d$  (palier court), alors 1 PIVOT = **1 palier long**  
 Si  $l > 1.5d$  (palier long), alors 1 PIVOT = **2 paliers courts**

Exemples de montages :



7. Comportement STATIQUE d'un palier lisse soumis à une charge radiale centrée

Pour les paliers lisses à frottement onctueux soumis, soit à l'arrêt, soit en fonctionnement, à des systèmes d'efforts, nous prendrons comme critère de comportement la **PRESSION de CONTACT** entre les surfaces de liaisons.

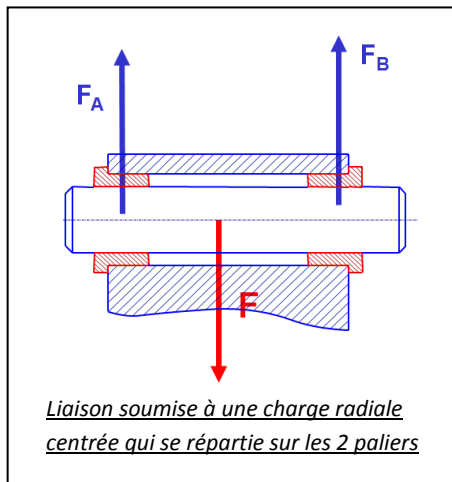
Cette pression étant **responsable de l'usure (jeu)**, des déformations des pièces...il conviendra de **la limiter**. Ce critère nous permettra de dimensionner le palier : **définir l et d**.

Hypothèses :

La liaison sera supposée parfaite et le torseur statique d'inter-efforts :  
Avec O, centre de la liaison = milieu palier)

$$\tau_s(1/2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ F_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_O$$

Voici l'unique cas **de chargement** envisagés dans le programme de PTSI :



Dans le programme de PTSI, lorsque les paliers sont soumis à un effort F centré que:  $F_A = F_B = F/2$

Pression diamétrale pour charge radiale F

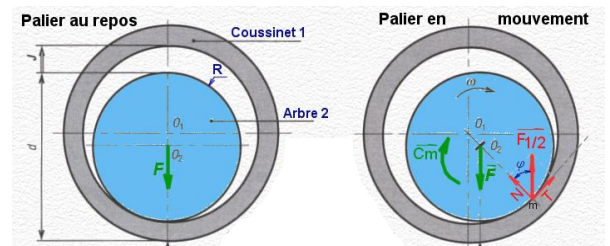
L'hypothèse de répartition de pression au contact entre l'arbre et l'alésage est déterminante pour la **validation de la liaison**. Elle dépend essentiellement de la **précision de réalisation de l'ajustement** et de la forme des inter-efforts appliqués. Meilleure est la précision, plus grande peut être la surface de contact considérée.

Notion de frottement :

Pendant la rotation en régime permanent (vitesse constante et glissement de 2/1), il y a équilibre des moments et des résultantes.

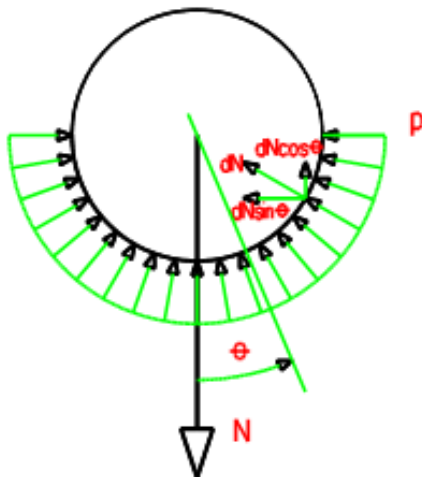
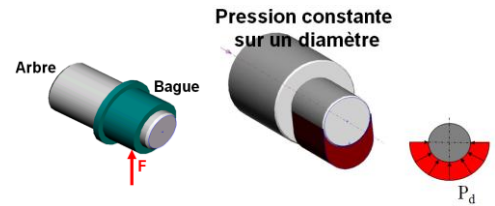
Le coussinet est soumis à :

- **Cm**: Couple moteur minimum entrainant la rotation de 2/1.
- **F**: Effort radial sur l'arbre 2
- **F1/2**: action mécanique du palier 1 sur l'arbre 2 (N) qui se décompose en une composante normale au contact (N) et une composante tangentielle (T)



La pression diamétrale :

C'est un outil d'évaluation de la **pression subie sur un contact surfacique cylindrique sollicité par un effort radial**, avec une hypothèse de **répartition uniforme de pression**. Cela ne peut en aucun cas refléter la réalité, mais beaucoup de constructeurs de coussinets se réfèrent à cette donnée qui reste représentative de la situation.



Calcul :

Sachant que N est appliquée au milieu du palier, l'équilibre de l'arbre permet d'écrire :

$$F = \int dN \cdot \cos \theta = \int p(\theta) \cdot dS \cdot \cos \theta$$

$$F = \int p \cdot r \cdot d\theta \cdot L \cdot \cos \theta$$

$$N = \int dN \cdot \cos \theta = \int p \cdot ds \cdot \cos \theta = \int p \cdot r \cdot d\theta \cdot L \cdot \cos \theta$$

$$= p \cdot r \cdot L \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot d\theta = p \cdot r \cdot L \cdot \left[ \sin \theta \right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = 2 \cdot p \cdot r \cdot L = p \cdot d \cdot L$$

Nota :

- les  $dN \cdot \sin \theta$  s'annulent.
- le contact se fait sur une longueur L

Donc : 
$$P_d = \frac{F}{Ld}$$

Conditions de résistance à la pression diamétrale:

$P_d < P_{adm \text{ maxi}}$  (valeur dépendant du matériau du coussinet)

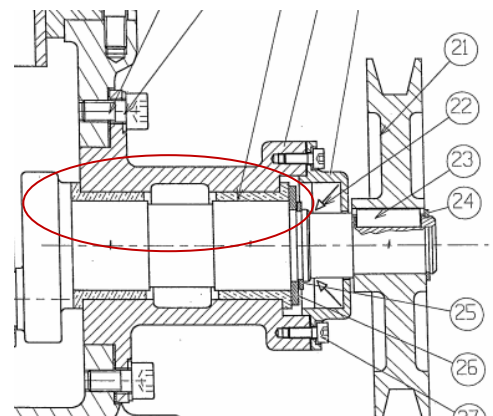
D'où, comme souvent on cherche à déterminer la longueur mini L du coussinet pour tenir la pression:

$$L \geq \frac{F}{d \cdot P_{adm}}$$

Conclusion :

Lorsque cela est possible, on place **le palier au plus près des points d'application des efforts radiaux**. Souvent, on fractionne la liaison en 2 paliers.

*On remarque souvent l'utilisation de **paliers épaulés**, ceci permet une **MIP de l'arbre** au montage (arrêt axial) et limite les frottements latéraux.*







8. Comportement DYNAMIQUE d'un palier lisse

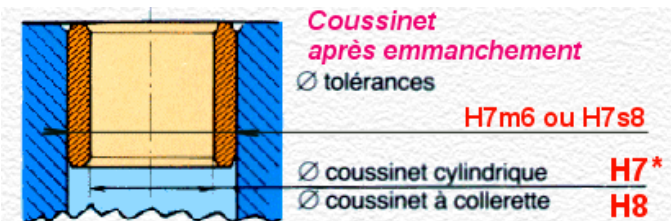
En général, l'utilisation de paliers lisses implique l'existence de d'un mouvement relatif entre les 2 pièces et le plus souvent sous charge. Il en résulte l'apparition de phénomènes tels que :

- Usure mécanique
- Echauffement
- Grippage...

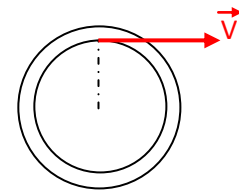
Ces phénomènes sont fortement liés à la charge mais aussi à la **vitesse de glissement: V**

Puissance aérolaire :

On appelle **puissance aréolaire** (du latin area, surface), le produit  $P_a.V$  où  $P_a$  est la pression diamétrale et  $V = \omega.r$  : **vitesse circonférentielle de glissement au rayon r (ou se trouve le glissement).**



Si le coussinet est serré sur bague extérieure, alors V est sur diamètre intérieur



Ce n'est pas la puissance surfacique dissipée dans la liaison mais elle lui est proportionnelle et c'est un outil pratique d'utilisation dont **les constructeurs connaissent les valeurs limites** dans les cas courants.

Pour éviter un échauffement excessif, il faut éviter que ce paramètre puissance aréolaire n'atteigne une **limite admissible notée  $\Pi_a$**  ( $W / m^2$  ou  $Mpa.m/s$ ) qui est exprimée à l'aide de la pression diamétrale.

$$p_d . v \leq \Pi_{adm}$$

Si on cherche la longueur mini du palier :

On a :  $F.v / d.L < \Pi_{adm}$  , avec  $v = (d/2).\omega$  d'où:

$$L \geq \frac{\omega.Fr}{2.\Pi_a}$$

Remarque: on voit que le critère de puissance aréolaire conduit à **déterminer la longueur du palier et ceci quel que soit son diamètre.**



9. Valeurs de  $P_{admissible}$  et  $pV_{admissible}$

Les valeurs maxi que peuvent prendre la  $P_{admissible}$  et le critère  $pV_{admissible}$  sont fournis dans les documentations constructeurs, mais à défaut on peut prendre :  $1N/mm^2 < p_{max} < 20N/mm^2$

Performances comparatives des coussinets usuels				
Type du coussinet	Vitesse maxi admissible (m/s)	Températures limites de fonctionnement (°C)	Pression admissibles en fonctionnement (Mpa)	Produit PV admissibles (Mpa).(m/s)
glacier acétal	2 à 3	- 40 à 100	14	0,5 à 0,9
glacier PTFE	3	-200 à 280	20	0,9 à 1,5
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

Paliers lisses « GLYCODUR ou glacier »

Les paliers Glycodur ont un support en tôle d'acier revêtu de cuivre sur lequel est fritté une couche poreuse de bronze.

- Avec revêtement PTFE = Glycodur F,
- Avec résine acétal = Glycodur A (possibilité de retouches d'usinage).

Nota : on s'aperçoit que pour des vitesses > 3m/s, ces paliers sont pas adaptés.

$$60 < P_{adm} < 80 \text{ Mpa}$$

Paliers lisses autolubrifiants « METAFRAM »

Voici les 2 types très couramment utilisés :

1°) Bronze BP25

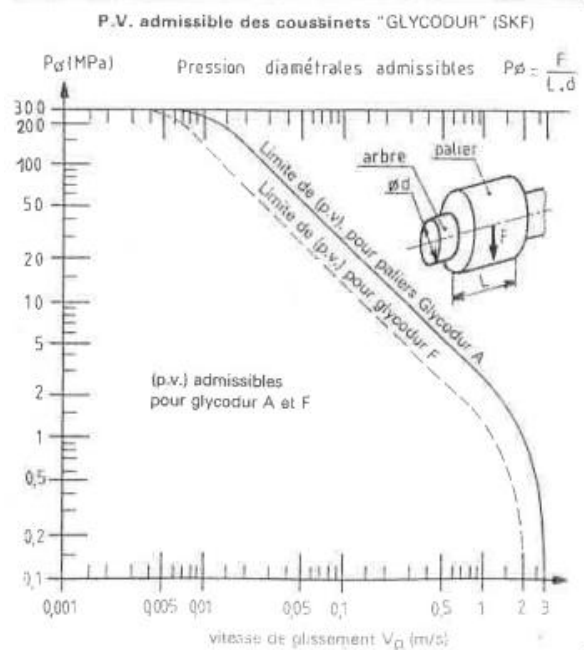
**Bague Bronze BP 25:  $P_{maxi} < 18Mpa$**   
 $V < 6m/s$

2°) Alliage ferreux FT15

**Bague Bronze FT 15:  $P_{maxi} < 45Mpa$**   
 $V < 4m/s$

**$Pv_{adm}$  bagues Bronze**  
**BP 25 et FP 15**  
 $1.8 \text{ Mpa.m. S}^{-1}$

**p.V admissible des coussinets GLYCODUR**





**Notice du fabricant de coussinets autolubrifiants Métafram**

Caractéristiques et avantages		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suppression des graisseurs et des frais d'entretien - Prix intéressant.</li> <li>- Limite de charge de 0 à 1500 da N / cm<sup>2</sup> - Limites de température de - 60 ° C à +450 ° C.</li> <li>- Limites d'ambiance, abrasion - radioactivité avec imprégnation spéciale.</li> <li>- Plus de grippage, présence permanente d'un véritable coussin d'huile.</li> <li>- Bon coefficient de frottement - Fonctionnement silencieux.</li> </ul>		
Deux nuances standard	Bronze BP 25	Alliage ferreux FP 15
Référence à rappeler Composition Masse volumique moyenne Charge statique maximale Vitesse linéaire maximale Jeu - Coussinets cylindriques Jeu - Coussinets à colerette Températures admissibles Coefficient de dilatation Huile d'imprégnation standard Taux d'imprégnation	METAFRAM BP 25 Cuivre - Etain 6,2 - 180 daN / cm <sup>2</sup> 6 mètres / seconde arbre alésage f7 - H7 arbre alésage f7 - H8 - 20 °C à 100 °C 19 x 10 <sup>6</sup> huile minérale inhibée 20 à 30 %	METAFRAMFP 15 Fer - Cuivre - Plomb 508 - 450 daN / cm <sup>2</sup> 4 mètres / seconde f7 - H7 f7 - H8 - 20 °C à 100 °C 12 x 10 <sup>6</sup> 8° Engler à 50 °C 15 à 25 %
Choix de la nuance	Très bon coefficient de frottement. Bonne résistance à la corrosion. Conseillé pour des vitesses élevées, des démarrages fréquents.	Conseillé pour des vitesses moyennes, des charges statiques élevées. Bonne résistance au matage. Arbre de préférence rectifié. Bon alignement recommandé.

**Abaque des charges / vitesses pour les nuances BP 25 ET FP 15**

Charges en da N / cm<sup>2</sup> de surface projetée

**Charges admissibles**

- Paramètres principaux
  - la vitesse de l'arbre
  - la charge spécifique
- Notion de P V
 

$P \times V = 18$

P : charge en da N / cm<sup>2</sup> de surface projetée (Ø int x long)  
 V : vitesse linéaire de l'arbre en m par seconde.  
 18 : valeur maximale admise pour nuances BP 15 et FP 15.  
 - Calcul pratique des charges

*Appelle' parfois:*  
*Surface diamétrale*

*Attention : unite' constructeur*

da N / cm<sup>2</sup>

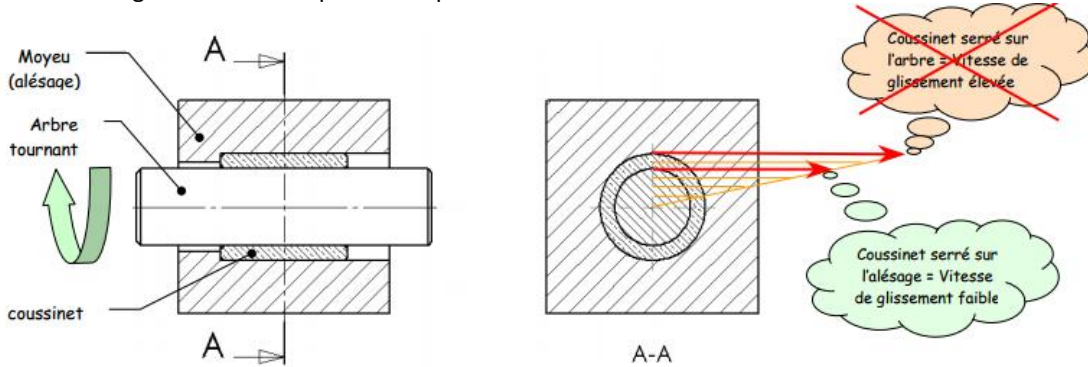
Ø de l'arbre en mm

Vitesse de rotation de l'arbre en tours par minute



### 10. Montage et ajustements

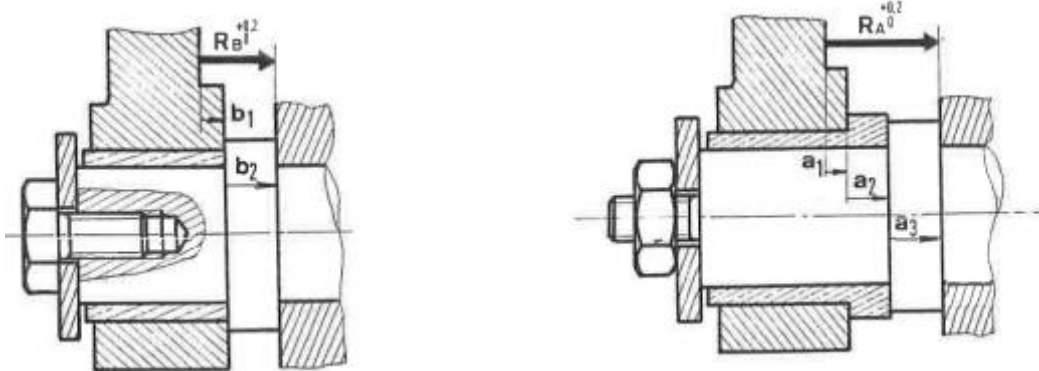
Afin de limiter les frottements, le coussinet doit être **monté SERRE sur l'ALESAGE**, et glissant sur l'arbre. De cette façon, la vitesse de glissement est la plus faible possible.



Exemples d'ajustements :

<p><b>Mandrin d'emmanchement</b></p> <p>Ø tolérances <b>m6</b></p> <p>Emmancher les coussinets à la presse en respectant les tolérances du mandrin pour obtenir :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— une parfaite mise en place,</li> <li>— le respect des tolérances finales</li> </ul> <p>3 à 30° 10</p>	<p><b>Logement en acier</b></p> <p>Ø tolérances <b>H7</b></p> <p>Le serrage entre coussinet et logement et les tolérances finales de l'alésage du coussinet ont été déterminés pour un logement en acier strictement de qualité H7.</p> <p>Pour tout autre nature de logement, nous consulter.</p>
<p><b>Coussinet après emmanchement</b></p> <p>Ø tolérances <b>H7m6 ou H7s8</b></p> <p>Ø coussinet cylindrique <b>H7*</b></p> <p>Ø coussinet à collerette <b>H8</b></p> <p>* Nota : Pour des coussinets cylindriques de Ø int. ≥ 60 mm, tolérance de l'alésage H8.</p>	<p><b>Arbre</b></p> <p>Ø tolérances <b>f7</b></p> <p>Nature : acier Hbar 80 mini pour BP25, Hbar 120 mini pour FP15.</p> <p>Etat de surface : de préférence rectifié.</p>

Exemples de montages :



Choix de la collerette ou non ?

On place en général un coussinet avec une collerette s'il y a besoin d'un arrêt axial pour la MIP. Attention, **un palier lisse ne doit pas encaisser d'effort axial !!**