

CI 4 – CONCEPTION : CONCEPTION DES MÉCANISMES

CHAPITRE 3 – CONCEPTION DES LIAISONS PIVOTS – UTILISATION DES 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

1	Cahier des charges d'une liaison pivot	2
2	Les solutions techniques	3
2.1	Satisfaire la fonction « Positionner » : isostatisme	3
2.2	Satisfaire la fonction « Guider » : rendement	4
2.3	Satisfaire la fonction « transmettre les efforts » : dimensionnement	4
3	Guidage par interposition de bagues	5
3.1	Les différents types	5
3.2	Montage	6
3.3	Dimensionnement : critères de choix	8
3.4	Protection	10
3.5	Comparaison	11
4	Guidage sans contact solide	11
4.1	Paliers hydrodynamique et hydrostatique	11
4.2	Paliers magnétiques	12

Ce document est en évolution permanente. Merci de signaler toutes erreurs ou coquilles.

1 Cahier des charges d'une liaison pivot

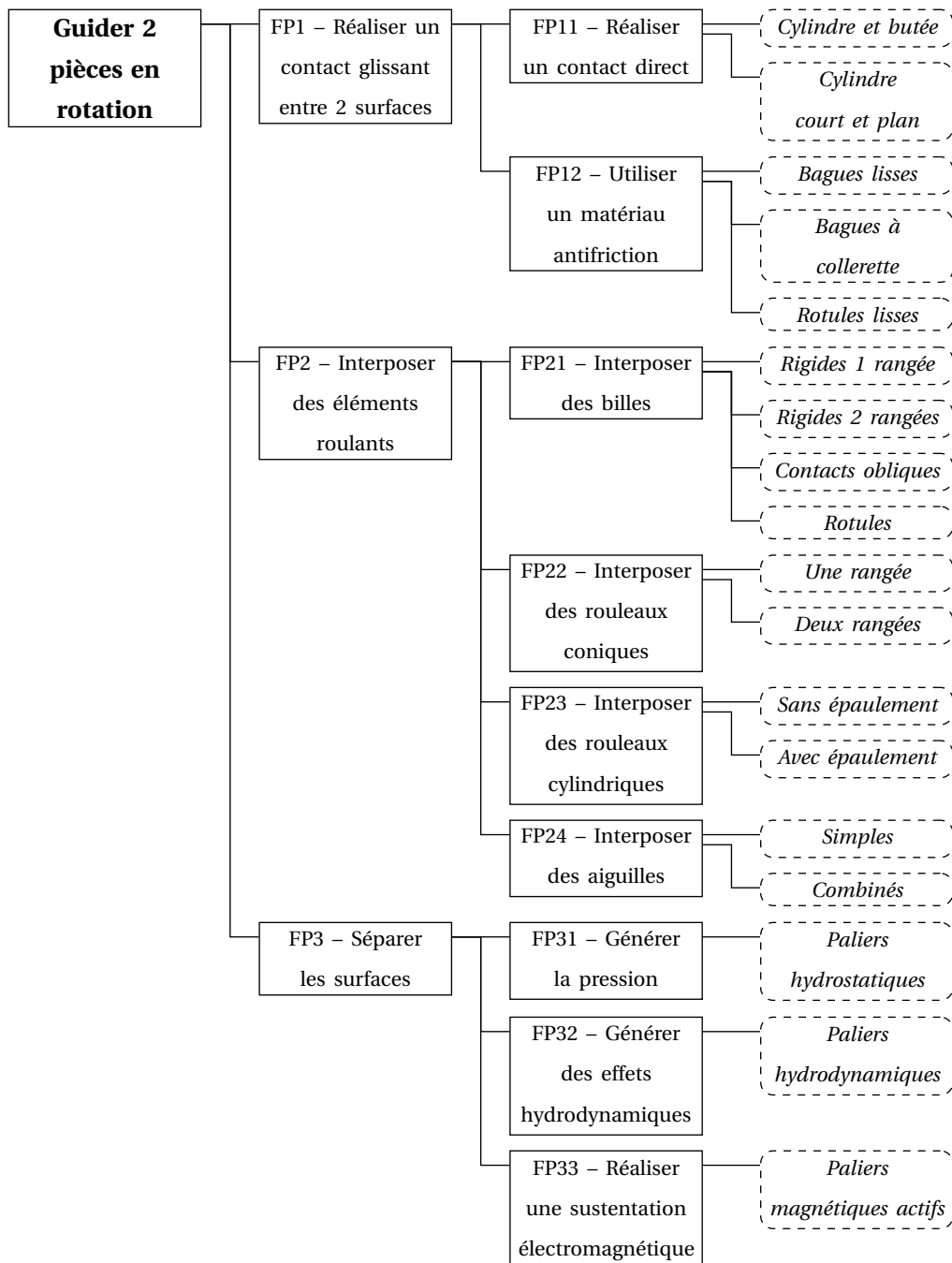
Le cahier des charges d'une liaison pivot peut se présenter ainsi :

Fonctions	Critères	Niveau	Flexibilité
Positionner les deux pièces entre elles	Précision du guidage, (isostatisme, critère L/D)	Tx, Ty, Tz (en mm) Ry, Rz (en rad) maxi	
Guider, permettre un mouvement relatif de rotation	Rendement	η en % mini	
	Vitesse de rotation	ω (en rad/s)	%
Transmettre et supporter les efforts	Efforts transmissibles	X, Y, Z (en N) M, N (en Nm)	%
	Durée de vie	Temps (h)	maxi
Résister à l'ambiance extérieure	Température, humidité, poussière		

D'autres fonctions de service peuvent également être mises en évidence :

- préserver l'environnement : bruit, pollution ;
- permettre le montage / la maintenance : temps et facilité de montage ;
- s'intégrer dans le mécanisme : encombrement.

2 Les solutions techniques



2.1 Satisfaire la fonction « Positionner » : isostatisme

Le positionnement sera d'autant plus précis que le montage sera isostatique.

Pour assurer une liaison pivot, on trouve globalement l'association des liaisons suivantes :

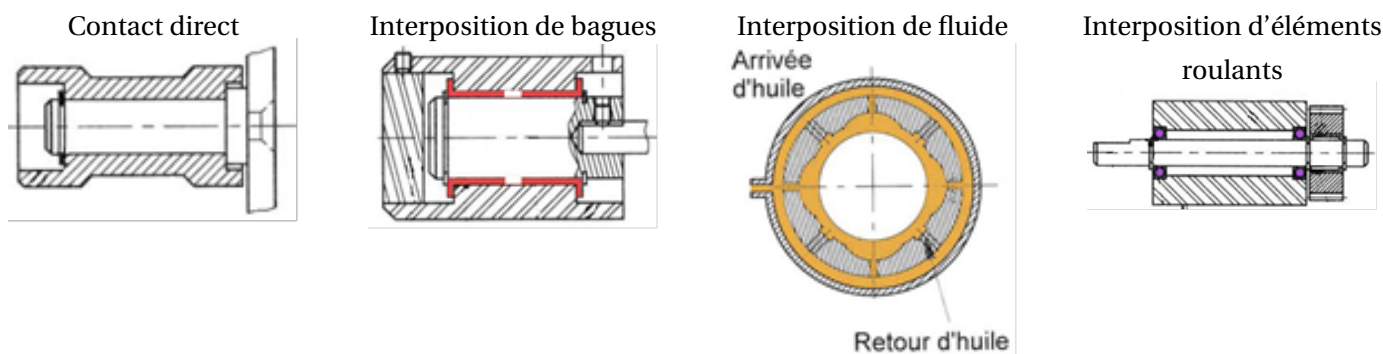
- pivot glissant et sphère-plan ;
- appui plan et sphère-cylindre ;
- rotule et sphère-cylindre.

Pour assurer une liaison pivot glissant, on peut trouver les solutions suivantes :



2.2 Satisfaire la fonction « Guider » : rendement

Le guidage doit se faire en limitant les pertes par frottement. Selon les conditions d'utilisation (vitesse, effort), les solutions peuvent être soit par glissement, soit par roulement.



Type de guidage en rotation	Contraintes		
	Précision	Vitesse de rotation	Efforts à transmettre
Par contact direct	-	--	-
Par interposition de bague de frottement	+	+	+
Par interposition d'éléments roulants	++	++	+++
Par interposition d'un film lubrifiant	+++	+++	++

2.3 Satisfaire la fonction « transmettre les efforts » : dimensionnement

Le dimensionnement de chacune des solutions précédentes dépend des types de solutions mais les principaux critères communs sont :

- la vitesse périphérique ;

- les efforts à transmettre ou la pression de contact ;
- les conditions environnantes (poussière, milieux corrosifs...) ;
- la durée de vie souhaitée.

3 Guidage par interposition de bagues

Économiques, 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.

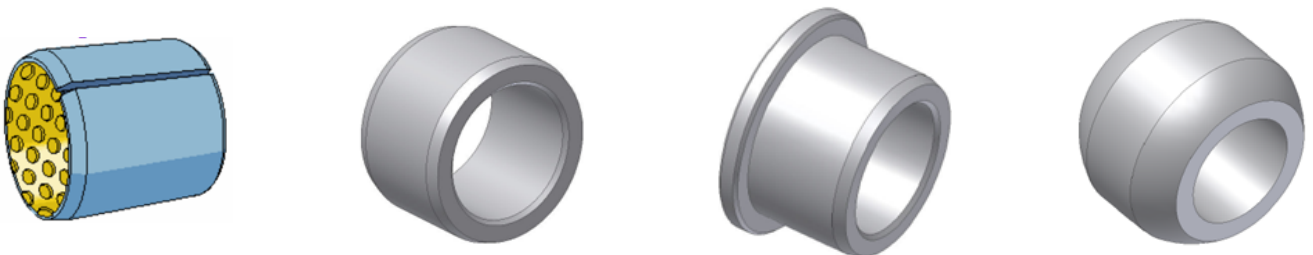
3.1 Les différents types

On distingue les paliers avec contact, et les paliers sans contact. Les premiers présentent évidemment davantage de frottements.

3.1.1 Coussinets autolubrifiants

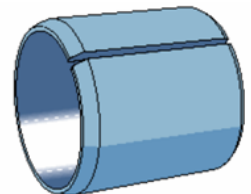
Ils sont fabriqués à partir de métal fritté¹ à base de bronze ($Cu Sn 8$).

Le frittage permet d'obtenir des pièces poreuses (porosités entre 15 et 35% en volume) et ainsi d'y incorporer du lubrifiant (huile, graphite...). Dans le cas de l'huile, la structure, comparable à une éponge, restitue l'huile en fonctionnement et l'absorbe à l'arrêt.



3.1.2 Les coussinets composites type "glacier"

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_2 ... Ils peuvent fonctionner à sec ou avec un léger graissage au montage sous des vitesses périphériques inférieures à 3 m/s.



1. Frittage : procédé de mise en forme des poudres. De la poudre est chauffée dans un moule, en dessous de la température de fusion. La poudre va se souder pour donner une pièce solide.

3.1.3 Les coussinets polymères (Nylon, PTFE, acétal...)

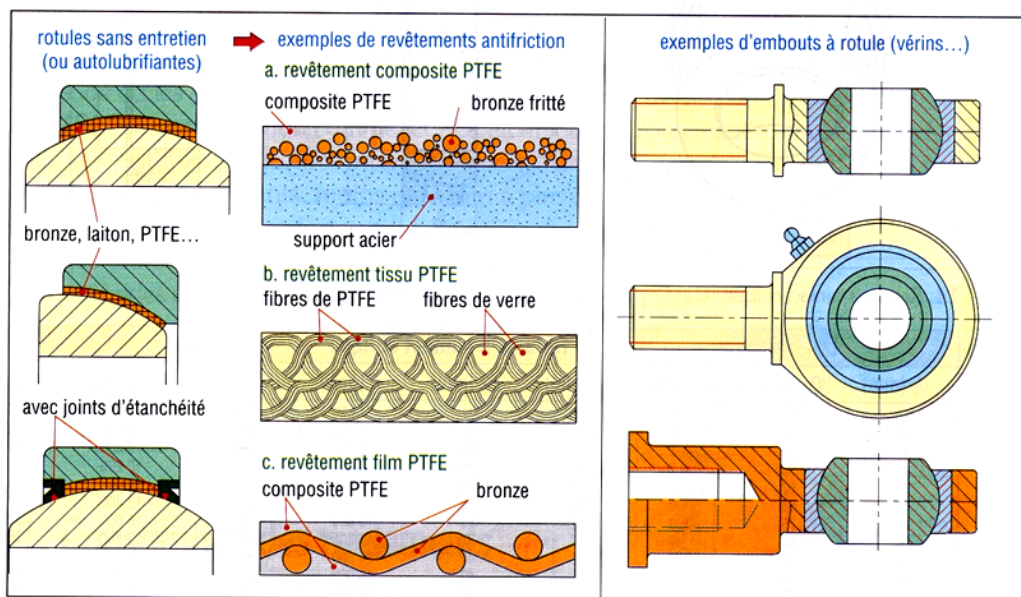
Surtout utilisés lorsqu'il est nécessaire d'avoir une grande résistance chimique (acides, bases, éléments corrosifs...) et une grande légèreté. Inconvénients : le fluage^a sous charge et un faible coefficient de conductivité thermique empêchant une bonne évacuation des calories.

^a. Déformation permanente d'un matériau sous l'effet d'une contrainte inférieure à la résistance élastique (R_e).



3.1.4 Rotules lisses

Elles permettent de corriger les défauts d'alignement.



3.2 Montage

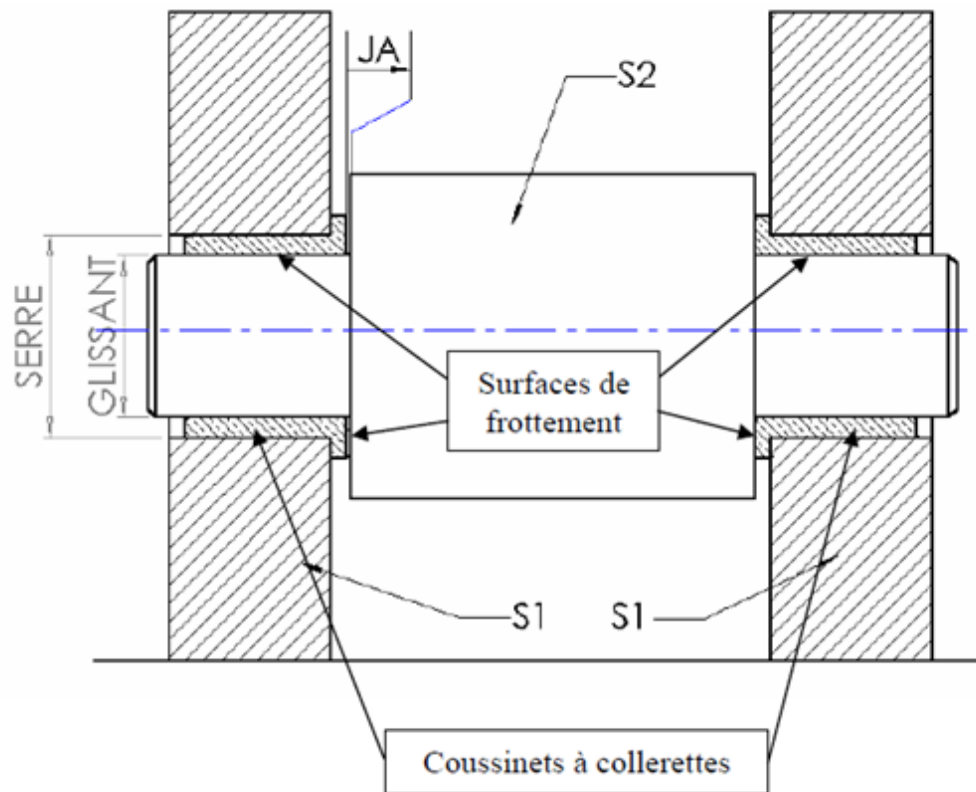
3.2.1 Architecture

Surface(s) assurant le pivot glissant :

Un centrage long (cylindre long) ou deux centrages courts (cylindre court)

Surface(s) assurant la butée :

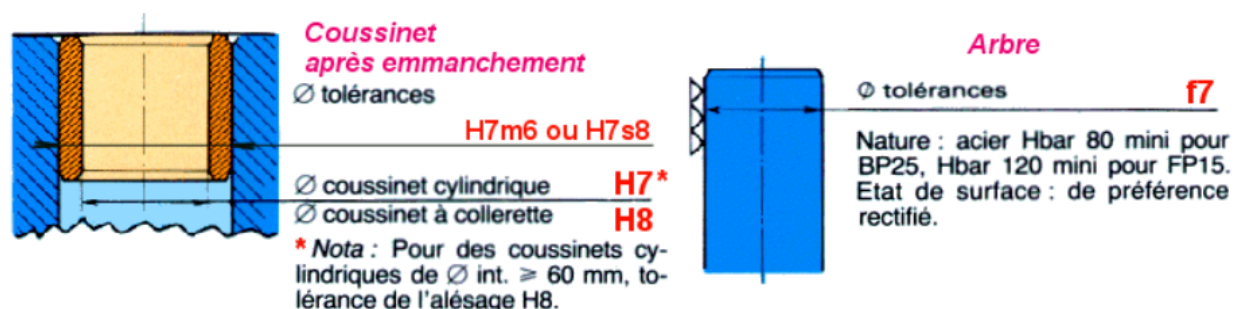
Pour assurer la bilatéralité du contact, il faut deux plans parallèles ("petits"), et donc un jeu axial minimal pour garantir la rotation sans coincement sous l'effet des défauts de fabrication et des variations de longueur dues aux dilatations



3.2.2 Contraintes à imposer aux surfaces d'accueil

Ajustement

La précision du guidage (jeu angulaire limité) limite le jeu diamétral entre l'arbre et le coussinet à 2 à 4/1000 du diamètre.



Sur le dessin d'ensemble on se contente de faire figurer les ajustements,

- dans la zone de glissement : f7
- et dans la zone d'encastrement des bagues : H7 pour l'alésage de fixation (la dimension de la bague avant montage est souvent s7 pour qu'après son montage dans un alésage H7, l'alésage de la bague soit H7).
- Jeu axial :
 - Le jeu axial sera indiqué sous la forme d'une condition fonctionnelle.
- État de surface :

- on impose une rugosité conforme aux préconisations du constructeur : $Ra\ 0,8\ \text{maxi}$
- Dureté de l'arbre
- une portée de glissement de l'arbre durcie superficiellement (écrouissage ou trempe) donne de meilleurs résultats (moins de risque de grippage).

Contraintes géométriques :

Les surfaces accueillant les coussinets doivent porter une tolérance de cylindricité.

Lorsque deux paliers lisses sont nécessaires pour réaliser la liaison pivot, une spécification de coaxialité doit être portée entre les axes des alésages.

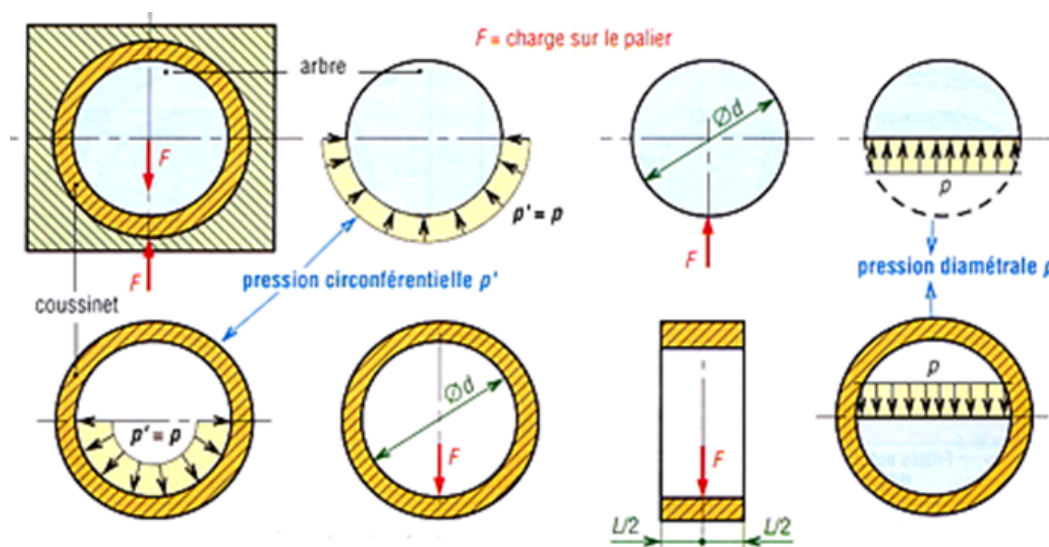
Enfin, pour les paliers à collerettes, une spécification de perpendicularité peut être portée entre l'axe du cylindre et le plan d'appui.

3.3 Dimensionnement : critères de choix

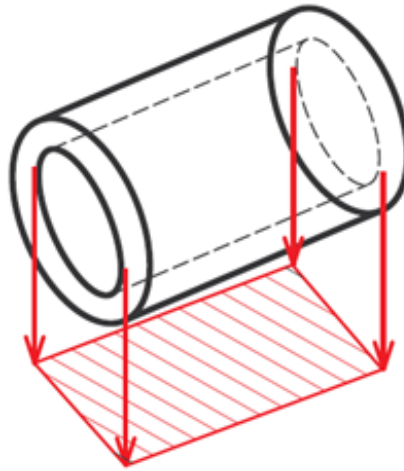
La procédure de calcul varie sensiblement d'une famille à l'autre et d'un fabricant à l'autre. Pour des choix précis utiliser les documents constructeurs. Cependant ces calculs (durée de vie, longueur du coussinet...) font régulièrement intervenir les notions de pression diamétrale P et de produit PV .

3.3.1 Pression

Pour éviter les phénomènes de matage, on impose un critère de pression admissible maximal. On applique le critère de la pression diamétrale moyenne et on vérifie que la valeur reste inférieure au maximum possible pour le cas étudié. Cette pression diamétrale est déterminée en supposant que la répartition de pression est uniforme et répartie sur un demi-cylindre.



Pression diamétrale :



$$p = \frac{F}{L \cdot d} < p_{adm}$$

Rappel de la démonstration de l'effort engendré par une pression constante :

Exemple

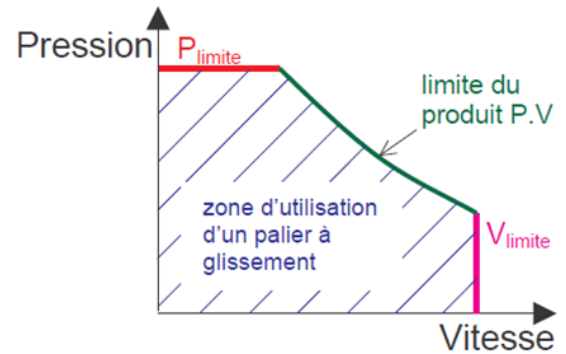
3.3.2 Vitesse

Le paramètre important est la vitesse linéaire au niveau du contact coussinet/arbre. Cette vitesse doit être limitée pour éviter une usure trop importante : $\overrightarrow{V(M \in \text{arbre/coussinet})} = R_{\text{arbre}} \cdot \omega_{\text{arbre/bati}} < V_{\text{limite}} \text{ (m/s)}$. On doit aussi vérifier que cette vitesse ne dépasse celle qui est préconisée par le constructeur.

3.3.3 Produit PV

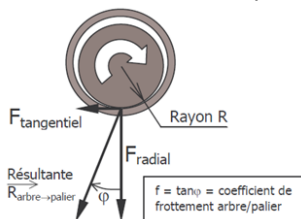
Il existe des combinaisons pression/vitesse pour lesquelles le palier s'échauffe trop : la température du palier augmente et la destruction est rapide. Le produit pV , caractérise l'énergie dissipée dans le palier par unité de surface. Il est donc caractéristique de la chaleur dégagée dans la zone de contact, donc de l'usure et du risque de grippage.

Les fabricants de bagues standard donnent des valeurs admissibles en fonction des conditions d'utilisation et des matériaux constituant les bagues.

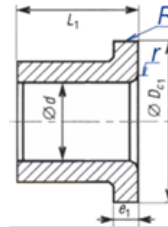


3.3.4 Frottement

Frottement sur la surface cylindrique



Frottement sur l'épaule



En cas d'utilisation de coussinets à collerettes, il faut ajouter le couple de frottement de l'arbre contre l'épaulement

On a :

$$C_f = \tan \varphi F_{Radial} \cdot R$$

$$C_f = \frac{2}{3} \frac{f N (R^3 - r^3)}{(R^2 - r^2)}$$

On peut alors déterminer la puissance perdue par frottement : $P = C_f \cdot \omega$

- P : puissance dissipée exprimée en Watt (W)
- C_f : couple de frottements (N.m)
- ω : vitesse angulaire de l'arbre par rapport au bâti (en rad/s)

Cette puissance correspond à l'énergie qu'il faut évacuer pour chaque unité de temps sous forme de chaleur. La chaleur s'évacue :

- par le bâti : Surface d'échange importante, faible élévation de la température.
- par l'arbre : Surface d'échange limitée, élévation de la température.

Cette élévation de la température modifie :

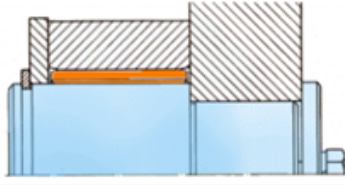
- les jeux de fonctionnement par dilatation (risque de grippage pour jeu initial insuffisant) ;
- les qualités du lubrifiant ;
- les caractéristiques physiques des matériaux.

3.4 Protection

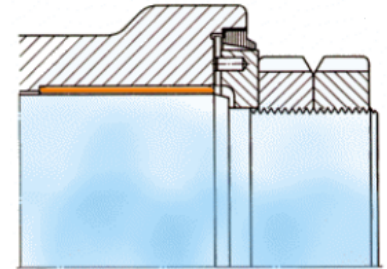
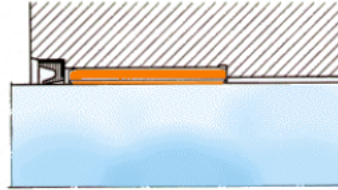
Les paliers sont généralement peu sensibles aux impuretés. Lorsque l'environnement est pollué, on peut avoir recours aux solutions suivantes :

Joint spéciaux

Protection par les éléments voisins



Joint à lèvres



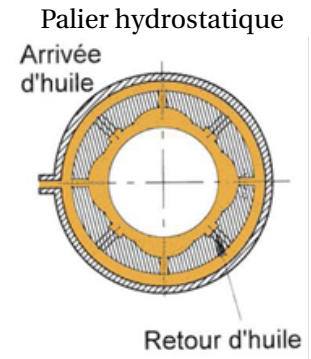
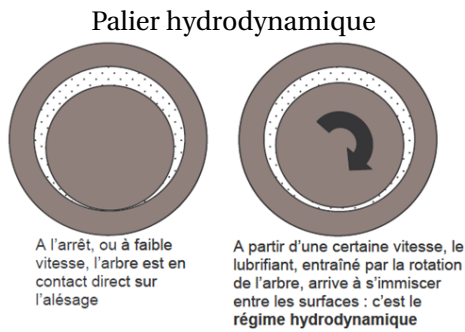
3.5 Comparaison

Performances comparatives des coussinets usuels				
Type de coussinet	Vitesse maximale admissible (m/s)	Températures limites de fonctionnement ($^{\circ}C$)	Pression admissible en fonctionnement (MPa)	Produits PV admissibles ($MPa \cdot m/s$)
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

4 Guidage sans contact solide

4.1 Paliers hydrodynamique et hydrostatique

Ils peuvent tourner plus vite et plus longtemps... Les paliers hydrostatiques sont bien adaptés au cas de charges importantes. Application : broches d'aléseuses et de rectifieuses de grande précision, rotor de la pompe primaire des réacteurs nucléaires N4

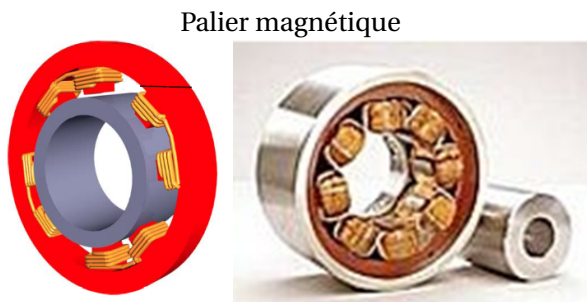


Avantage : économique par rapport à ceux de droite
Inconvénient : surfaces mal lubrifiées au démarrage

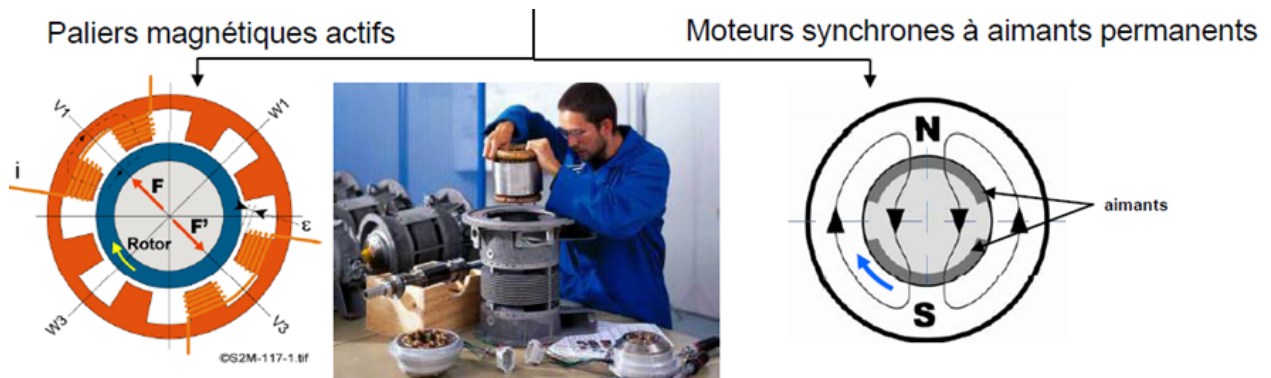
Avantage : charges importantes, peu de pertes
Inconvénient : coûteux, nécessite une pompe

4.2 Paliers magnétiques

Développés à l'origine pour des besoins militaires et spatiaux, les paliers à sustentation magnétique prennent leur essor industriel dans les machines tournantes et les pompes à vide. Son rotor « flotte » dans un champ de forces électromagnétiques contrôlées, donc sans contact, sans frottement, sans pertes d'énergie, sans lubrifiant.



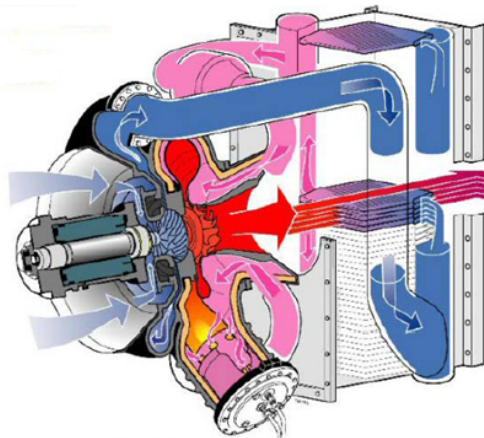
Applications : Machines rapides motorisées :



- pas de lubrification nécessaire, pas de pollution du process ;
- très grande vitesse périphérique possible (jusqu'à 250 m/s) ;
- très faible niveau de vibrations (contrôle dynamique) ;
- pertes faibles ;
- très bon rendement ;

- faible allongement du rotor.

Exemple : Microturbine à gaz pour la production d'électricité et d'eau chaude



Carburant	Gas naturel (biogas, diesel, kerosene, methanol possible)
Vitesse	70000 rpm
Puissance électrique fournie au réseau	100 kW
Rendement électrique du système	33 %
Puissance thermique	155 kW
Rendement combiné	77 %
Bruit	70 dBa @ 1m

Autres exemple : Guidages sur les machines outils d'UGV

Références

- [1] http://www.igus.fr/wpck/default.aspx?Pagenam=Manus11_Handprothese&CL=DE-en
- [2] http://www.igus.fr/wpck/default.aspx?Pagenam=app_actuatingmechanism&CL=FR-fr
- [3] <http://www.usinenouvelle.com/expo/img/pompes-turbomoleculaire-000111712-4.jpg>
- [4] Conception – Guidage en rotation – Guidage par paliers lisses, Supports de cours de Maryline Carrez, Lycée Jules Haag, Besançon
- [5] Construction Mécanique – Les paliers lisses ou coussinets – Familles de coussinets, dimensionnement, montage, comparatif, Didier Noël ??, LP Pierre et Marie Curie, Aulnoye <http://noel.wifeo.com/documents/Les-Paliers-lisses-ou-Coussinets.pdf>