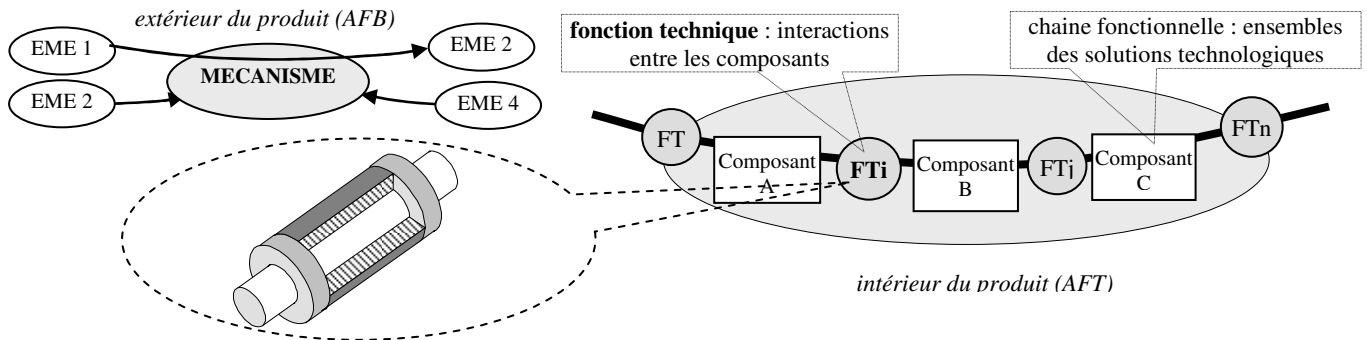


LIAISON PIVOT

GUIDAGE EN ROTATION PAR GLISSEMENT : PALIERS LISSES

1 RAPPEL : ANALYSE FONCTIONNELLE TECHNIQUE D'UN MECANISME

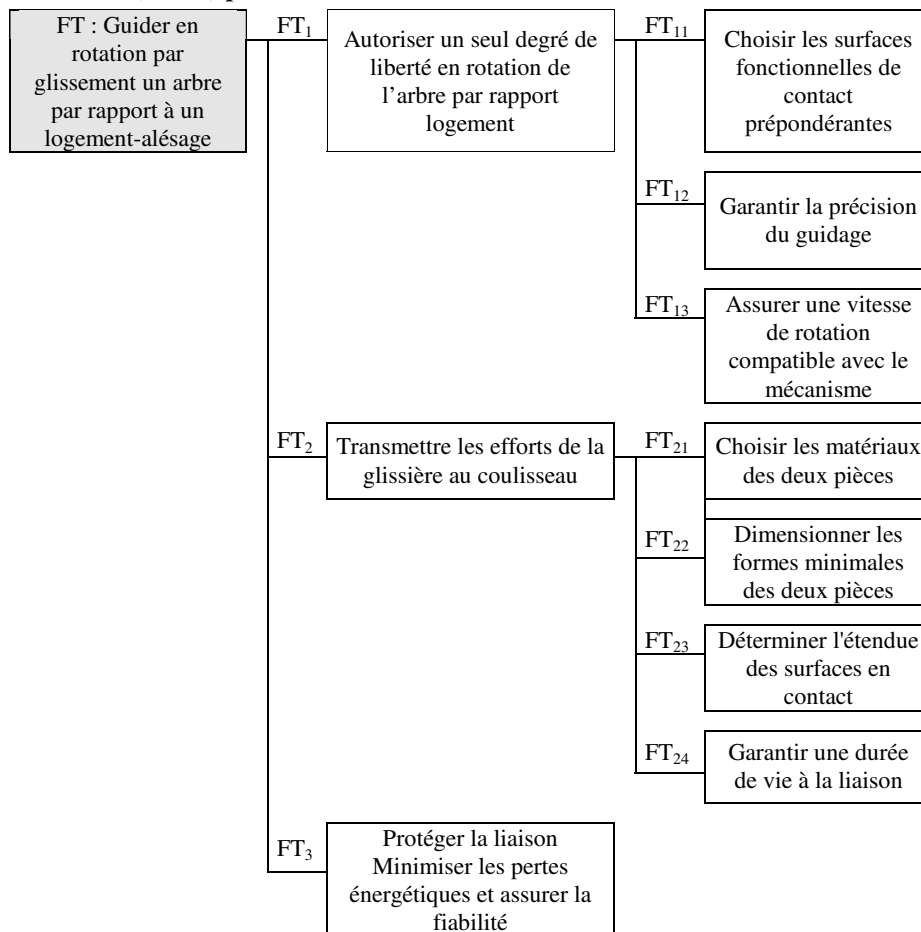


FTi: guider en rotation par glissement l'élément mobile (en général un arbre) par rapport à un élément de référence (logement-moyeu) du mécanisme environnant

Terminologie : **palier**: organe mécanique permettant d'assurer cette fonction technique. Deux types de paliers: **palier lisse**: guidage en rotation par glissement (insertion d'un coussinet) et **palier à roulement**: guidage en rotation par roulement (*Cf. cours ultérieur*). L'étude d'une pivot glissant est analogue à celle de la liaison pivot pour sa réalisation avec des paliers lisses.

2 FONCTIONS TECHNIQUES A REALISER PAR UNE LIAISON PIVOT PAR GLISSEMENT

2.1 Diagramme fonctionnel (FAST) partiel

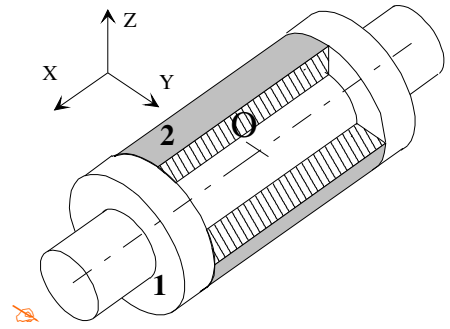


➔ pour réaliser ces **fonctions techniques**, le contenu de ce cours présente quelques solutions technologiques de liaisons pivot par **glissement**.

2.2 Fonction technique FT₁ « Mettre en position partielle »

2.2.1 Torseur cinématique caractérisant le mouvement relatif de l'arbre 1 / alésage 2

$$\left\{ \mathcal{V}_{\text{arbre 1 / alésage 2}} \right\}_O = \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array} \right\}_O$$



2.2.2 Palier lisse ordinaire (Cf. ouvrage Guide des STI ch. 23 § I)

2.2.2.1 Constitution d'un palier lisse

- un arbre
- un support ou bâti (en une ou deux parties)
- dispositif de graissage si le coussinet n'est pas autolubrifiant
- deux dispositions constructives usuelles
palier long et 2 paliers courts

- un coussinet assurant la transmission des efforts, le guidage en rotation et ayant pour caractéristiques:
 - couple de matériau en contact à faible coefficient de frottement
 - report de l'usure sur cette seule pièce
 - usinage, montage, démontage plus facile
 - résistance au matage, évacuation des calories, résistance à la corrosion
 - forme lisse ou à collerette

Coussinet lisse et coussinet à collerette	Palier long	Deux paliers courts

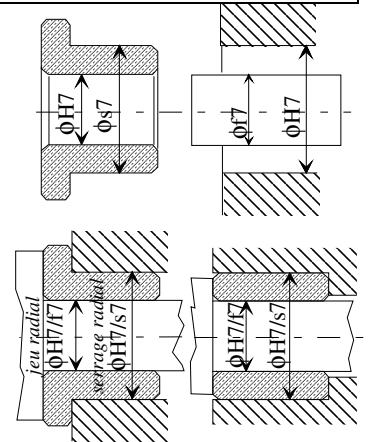
2.2.2.2 Mise et maintien en position du coussinet par rapport à l'alésage

- mise et maintien en position radiaux: ajustement du type "serré"; (H/m, H/p ou H/s) respecter les consignes des constructeurs; l'affectation habituelle d'un ajustement serré entre coussinet et alésage est justifiée par le fait que les coussinets "travaillent" mieux en compression qu'en extension (par rapport au choix d'un ajustement serré entre arbre et coussinet) et une vitesse de glissement moindre entre arbre et coussinet.
- mise en position axiale: épaulement dans alésage ou collerette sur le coussinet ou libre (pas de charge axiale).

2.2.2.3 Mise en position de l'arbre par rapport au {logement + coussinet}

- mise en position radiale: ajustement du type "tournant" (H/f);
- mise en position axiale: épaulement sur arbre (ou autres arrêts axiaux du type anneau élastique avec rondelle) ou libre (pas de charge axiale).

Si la distance entre les deux paliers (entraxe) est importante, il est préférable d'utiliser des paliers auto-alignants (rotules).



2.2.3 Jeu radial et précision du guidage

La liaison étant par glissement, il est nécessaire de prévoir un jeu radial minimal de fonctionnement. La précision du guidage dépend :

- du jeu j , avec $j = D - d$,
- ou du rapport de guidage k , avec $k = L/d$. L'angle de déviation angulaire α , avec $\tan \alpha = j/L$, est minimisé si le rapport de guidage augmente, mais le gain de précision angulaire est faible au delà de $k \geq 4$ et croît rapidement pour $k \leq 1$.

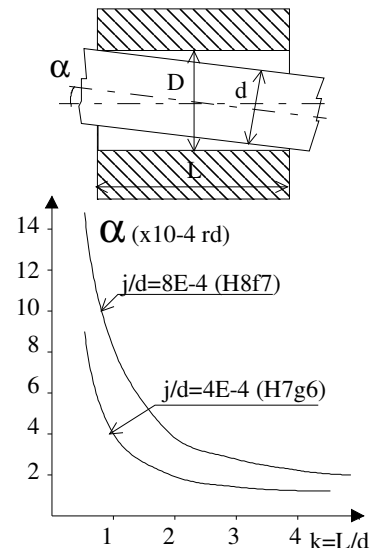
2.2.3.1 Un jeu de fonctionnement trop faible entraîne des contacts métalliques fréquents provoquant:

- un échauffement, une dilatation, et souvent un grippage;
- une rupture du film d'huile, donc des variations du coefficient de frottement, c'est à dire des à coups.

2.2.3.2 Un jeu de fonctionnement trop grand provoque:

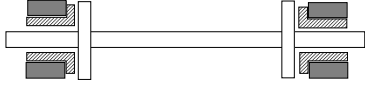
- un guidage peu précis;
- une mauvaise formation du film d'huile lorsque l'on a prévu un graissage hydrodynamique.

Les abaques des constructeurs permettent de trouver α et j en fonction de la charge radiale F sur l'arbre, de L , de d et de l'entraxe des paliers.

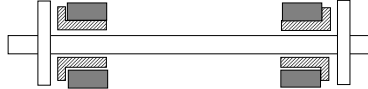


2.2.4 Architectures de liaisons pivots à guidage court avec coussinets.

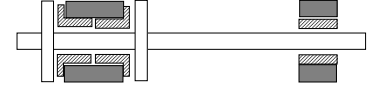
réservé aux arbres courts en cas de dilatation



solution la plus courante; fonctionnement avec jeu axial important en cas de dilatation



précision axiale peu altérée par la dilatation de l'arbre



2.3 Fonction technique FT₂ « Transmettre des actions mécaniques »

2.3.1 Modélisation des actions transmissibles du (des) palier(s) sur l'arbre

Il s'agit de proposer des modélisations simples des liaisons paliers dans le cadre de prédimensionnement des actions mécaniques transmissibles sur chacun d'eux afin de déterminer ou de vérifier les dimensions des coussinets (appliquer le principe fondamental de la dynamique en négligeant les masses en mouvement)

Cas d'une liaison pivot parfaite : champ des forces élémentaires de contact normales aux surfaces en contact.

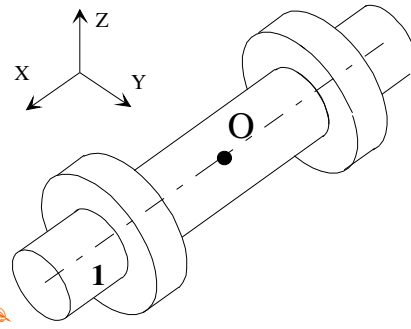
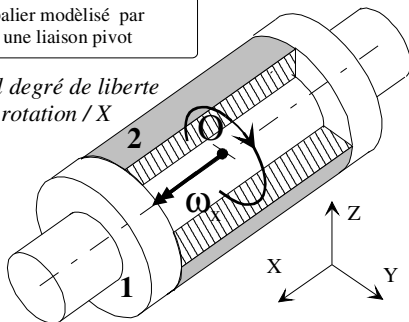
⇒ un guidage long:

éléments de réduction du torseur des actions mécaniques extérieures de l'alésage du palier sur l'arbre (au centre géométrique O de la pivot)

$$\left\{ \mathcal{F}_{\text{alésage2/arbre1}} \right\}_O = \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array} \right\}_O$$

palier modélisé par une liaison pivot

1 seul degré de liberté rotation / X



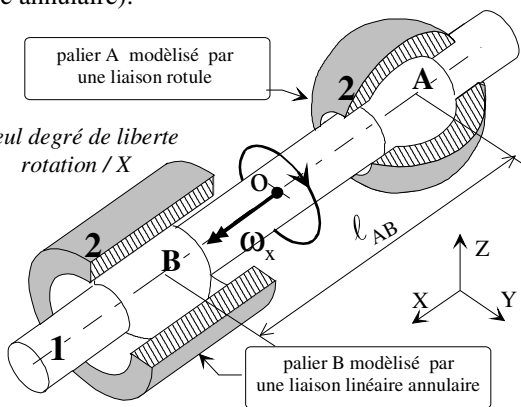
⇒ deux guidages courts: modélisation cinématique isostatique, éléments de réduction des torseurs des actions mécaniques extérieures des alésages des paliers A et B sur l'arbre (aux centres géométriques A de la rotule et B de la linéaire annulaire):

$$\left\{ \mathcal{F}_{\text{alésage2}_A/\text{arbre1}} \right\}_A = \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array} \right\}_A$$

$$\left\{ \mathcal{F}_{\text{alésage2}_B/\text{arbre1}} \right\}_B = \left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \end{array} \right\}_B$$

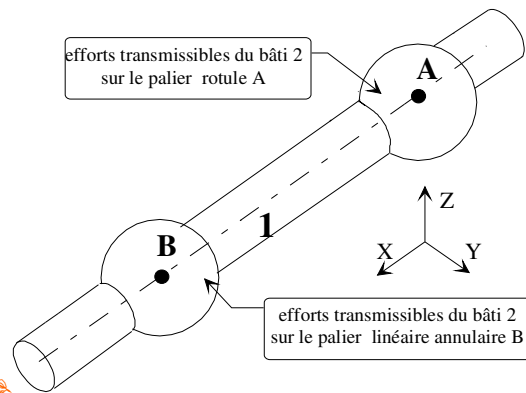
palier A modélisé par une liaison rotule

1 seul degré de liberté rotation / X



palier B modélisé par une liaison linéaire annulaire

efforts transmissibles du bâti 2 sur le palier rotule A



efforts transmissibles du bâti 2 sur le palier linéaire annulaire B

2.3.2 Dimensionnement d'un palier

2.3.2.1 A partir du diamètre de l'arbre d :

Le diamètre est déterminé à partir de la DdS : sollicitations de flexion, torsion, cisaillement.

2.3.2.2 A partir de la longueur de la portée du coussinet L :

Elle est déterminée par des considérations d'isostatisme et de précision du guidage:

- un guidage long: comportement de liaison pivot (ou pivot glissant): rapport de guidage $k = L/d = 1,5 \text{ à } 2$
- deux guidages courts: comportement de liaisons linéaires annulaires (ou rotules) $k = L/d < 0,5$

En règle générale utiliser les longueurs standards des catalogues des coussinets.

2.3.2.3 A partir de la pression diamétrale de contact p entre l'arbre et le palier (Cf. ouvrage Guide des STI ch. 23 § I.2)

■ hypothèses:

- liaison sans jeu radial (contact surfacique demi cylindrique), pas de déformation, fonctionnement à sec ou peu de lubrifiant
- radialement et longitudinalement répartition uniforme des forces élémentaires de contact donc de la pression de contact p

■ arbre 1 isolé

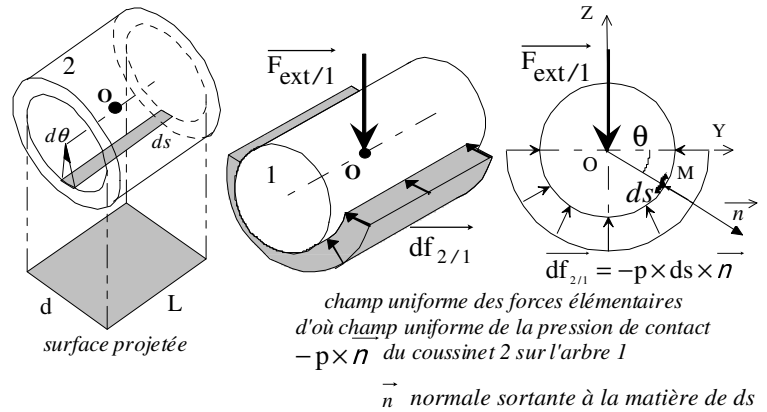
■ torseur des actions mécaniques ext./1:

$$\{\mathcal{F}_{ext/1}\}_O = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_O = \vec{F}_{ext/1} = F_{radiale} \vec{Z} \\ \vec{M}_O = \vec{0} \end{array} \right\}_O$$

■ torseur des actions mécaniques de contact de 2/1

$$\{\mathcal{F}_{2/1}\}_O = \left\{ \begin{array}{l} \Sigma d\vec{f}_{2/1} \\ \Sigma \vec{OM} \wedge d\vec{f}_{2/1} = \vec{0} \end{array} \right\}_O \Rightarrow d\vec{f}_{2/1} = -p \times ds \times \vec{n}$$

expression de la surface élémentaire : $ds = L \times \frac{d}{2} \times d\theta$



■ équilibre de l'arbre 1 (principe fondamental de la statique):

$$\{\mathcal{F}_{ext/1}\}_O + \{\mathcal{F}_{2/1}\}_O \equiv \{0\}$$

■ l'équation de projection des forces / Z :

(en préalable projection sur \vec{Z} de la force élémentaire de contact : $d\vec{f}_{2/1} \cdot \vec{Z} = (-p \times ds \times \vec{n}) \cdot \vec{Z} = -(p \times \sin \theta \times ds)$)

$$- \|F_{radiale}\| + p \times L \times \frac{d}{2} \times \int_0^\pi \sin \theta \times d\theta = 0$$



- $p < p_{adm}$: condition de non matage ou condition pour éviter l'expulsion du lubrifiant ou la rupture du film onctueux (cf. § 2.4.2)

- quelques valeurs usuelles de p_{adm} :

- palier courant $p_{adm} = 0,5$ à $1,5$ MPa:

- graissage onctueux $p_{adm} = 1,5$ à $2,5$ MPa

- graissage par film $p_{adm} = 2,5$ à $4,5$ MPa

- diamètre d min arbre respectant le critère $p < p_{adm}$:

$$d_{min} \geq \sqrt{\frac{F}{k \times p_{adm}}}$$

2.3.2.4 A partir des phénomènes thermiques (associé au calcul de la pression de contact pour régime mixte).

L'étude du comportement thermique d'un palier met en évidence l'importance du produit (pV) avec :

(pV)	=	p	\times	V
produit (pV)		pression de contact		vitesse de glissement
(W/m ²)		de l'arbre sur le palier		tangentielle de l'arbre
		(Pa ou N/m ²)		(m/s)

Le produit $(pV)_{max}$ étant indiqué par les fabricants de

coussinets on peut alors calculer la pression de contact maxi entre arbre et coussinet .

$$p_{max} < \frac{(pV)_{max}}{V}$$

- longueur L de la portée du coussinet respectant ce critère :

$$L > \frac{F \times V}{(pV)_{max} \times d}$$

Exemple de désignation : Bague "Métafram" $(pV)_{max} = 18$ (données constructeur) avec p en daN/cm² et V en m/s, avec des unités du SI: $(pV)_{max} = 1.8 \text{ E}6 \text{ W/m}^2$

Calcul en ligne : http://194.172.152.2/main_fs.asp?KATALOG=XIGLIDUR&GO=IGLIDUR_EXPERTE

2.3.3 Matériaux.

2.3.3.1 Arbre

Généralement en acier pour cause de résistance. Réduction de l'usure et du risque de grippage par un bon état de surface (rugosité après rectification: $0,4 < Ra < 0,8$).

2.3.3.2 Coussinet:

	matériaux	fabricants
métaux blancs	étain majoritaire ou plomb majoritaire (régulage), lubrification nécessaire	Glacier Tlc Bertrandias
bronze	bronze phosphoreux, alliage étain-cuivre (CuSn8Pb), (lubrification nécessaire).	Cas des coussinets usinés dans la masse
matériaux frittés	matériaux de frittage bronze ou fer, obtention d'un matériau poreux imprégné d'un lubrifiant.	Coussinets autolubrifiants Métafram
matières plastiques	- matériaux thermoplastiques (Nylon, polyamide, PTFE (Téflon))	Bagues Star.
matériaux composites	- support en tôle d'acier avec tissage de fils métalliques et de fils Téflon, imprégnation dans de la résine (pas de lubrifiant) ou frittage au bronze imprégné de Téflon (pas de lubrifiant)	SKF INA

Sa valeur permet de mesurer la capacité du matériau à supporter l'énergie thermique engendrée par le frottement. En cas de dépassement de $(pV)_{max}$, la température du palier augmente et sa destruction est rapide. On montre que $(pV) = C \Delta T$, équivalent à une puissance surfacique (W/m²), où:

- ΔT : différence de température entre les surfaces de contact arbre-coussinet et l'air ambiant

- C: constante fonction de nombreux paramètres géométriques et physiques tels que:

- l'usure tolérable;
- la cylindricité des portées, la longueur des portées;
- le chargement, la vitesse linéaire;
- la nature des matériaux, l'état de surface;
- les surfaces d'échange permettant d'évacuer les calories;
- la lubrification supplémentaire

2.4 Fonction technique FT₃ « Protéger et minimiser les pertes énergétiques» (Cf. ouvrage Guide des STI ch. 34 § I)

2.4.1 Rôle du lubrifiant

Dans la plupart des liaisons, le lubrifiant constitue avec les surfaces de guidage un élément fondamental dans le comportement de la liaison. Il diminue les effets néfastes dus au frottement, protège les surfaces, répartit les pressions de contact, évacue la chaleur dissipée.

2.4.2 Rappels : notion de régimes de lubrification

■ *onctuosité*: aptitude du lubrifiant à adhérer aux surfaces frottantes et à former une couche permanente entre ces 2 surfaces.

■ *viscosité*: caractérise la résistance à l'écoulement dans un lubrifiant.

- viscosité dynamique: μ , coefficient de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le champ des vitesses dans un écoulement. Unité: pascal seconde (Pa.s). Exemple: eau: 0.001 Pa.s, huiles pour lubrification: $0.01 \leq \mu \leq 0.04$ (Pa.s).

- viscosité cinématique: $\nu = \mu/\rho$, (ρ : masse volumique). Unité: m²/s ou Stokes (1 St = 10⁻⁴ m²/s).

Ces coefficients interviennent dans les désignations normalisées d'une huile.

2.4.2.1 Fonctionnement à sec

Peu ou pas de lubrifiant (ex. coefficient de frottement acier/bronze: 0.15)

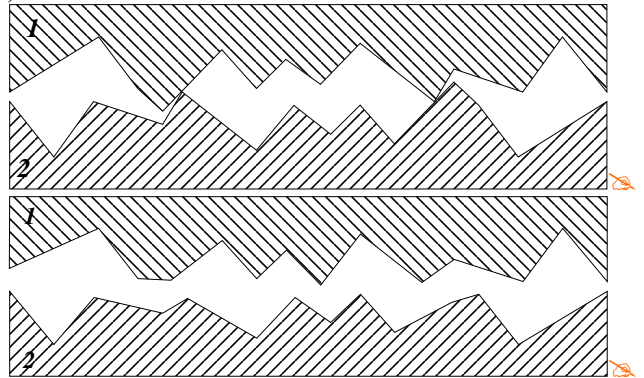
2.4.2.2 Régime onctueux

Faibles vitesses de glissement et fortes pressions: l'épaisseur du film d'huile ou de graisse est très faible. Existence de contacts "solides" et coefficient de frottement restant élevé (acier/bronze: 0.1)

2.4.2.3 Régime hydrodynamique

Si la vitesse de glissement est suffisante, la viscosité du lubrifiant adaptée et l'apport de fluide important il est possible d'obtenir un film d'huile porteur d'épaisseur supérieure aux défauts de surface. Il y a formation d'une pression hydrodynamique portante

Remarque: il existe un régime mixte intermédiaire aux deux précédents. Le type de régime intervient dans le choix technologique du palier lisse.



2.4.3 Dispositifs de graissage

Le régime onctueux peut-être assuré:

- pour la graisse: par pression avec utilisation de graisseur et de pompe à graisse;
- pour l'huile: par gravité, par barbotage et par l'utilisation de matériaux autolubrifiants

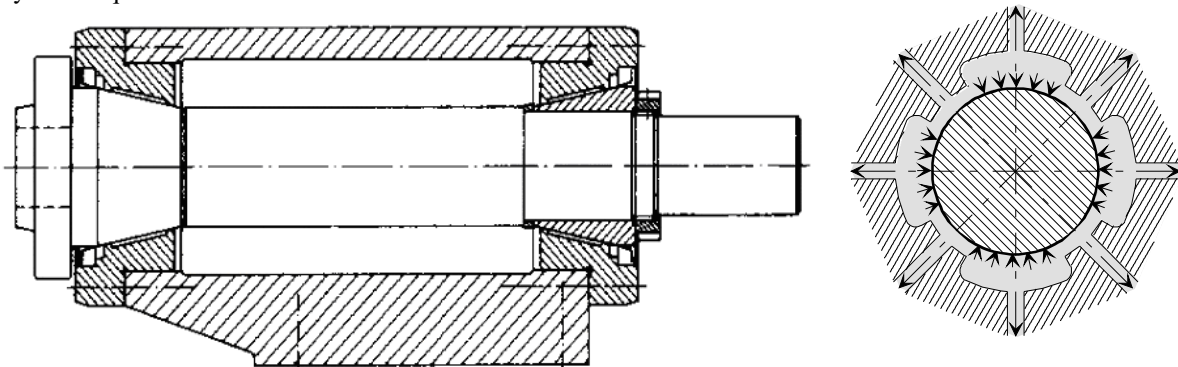
3 AUTRES TYPES DE PALIERS

3.1 Paliers hydrodynamiques (Cf. ouvrage Guide des STI ch. 23 § II)

3.2 Paliers hydrostatiques ou paliers fluides. http://www.skfequipements.skf.fr/fr/2/cat-cat1798-Broches_de_machine_outils.html

Création d'un film d'huile sous pression (200 bars). Coefficient de frottement: $\tan\phi = 0,001$. Les deux sens de rotation sont possibles, le démarrage doit se faire sous pression, centrale hydraulique nécessaire. La capacité de charge des paliers hydrostatiques dépend de la pression générée par la pompe. Cas d'emploi: vitesse élevée et fortes charges, mouvement lent sans à-coup et de grande précision (ex: télescope), grande dimension de palier.

Broche hydrostatique FAG de machine-outil:



3.3 Articulations sphériques- Rotules lisses (Cf. ouvrage Guide des STI ch. 23 § III)

3.4 Paliers à gaz (air) http://www.skfequipements.skf.fr/fr/2/cat-cat1798-Broches_de_machine_outils.html

Même principe que le palier hydrostatique mais utilisation d'un fluide très compressible de viscosité négligeable

3.5 Paliers magnétiques <http://www.skfmagneticbearings.com/>

Génération d'un champ magnétique contrôlé entraînant la lévitation de l'arbre dans l'alésage. L'arbre effectue ainsi une rotation sans contact. Le système capte la position de l'arbre et ajuste la force magnétique en temps réel de manière à le maintenir dans la position souhaitée. Avantages: absence d'impuretés dues à l'usure, aucune lubrification nécessaire, supportent des environnements sévères (températures extrêmes, ultravide, immersion), transfert de vibrations au palier limité, haute précision, élimination du faux-ronde de l'arbre lié à un balourd. Applications : broches de machines-outils, transports.

4 UTILISATION ET INTERETS DES COUSSINETS

- Prix faible par rapport au roulement de grande dimension
 - Fonctionnement silencieux
 - Facilité de montage et encombrement radial faible
 - Vitesse très élevée pour certains types de coussine
 - Absorption des chocs
 - Pression de contact élevée (jusqu'à 150 MPa)
 - Capacité de charge C importante pour palier hydrodynamique
- aux grandes vitesses (pour un roulement C diminue si ω croît
 - Utilisation en milieu corrosif, alimentaire, non compatible avec les huiles
 - Vaste intervalle de température de fonctionnement (-200° à 500°)
 - Si ω est faible et le système peu chargé le coussinet est mieux adapté qu'un roulement

Le choix entre un roulement et un coussinet est délicat et est fonction de l'importance que l'on accorde aux facteurs précédents et surtout aux termes (pV) et p.