AVERTISSEMENT ET EMPLOI DES COMPLÉMENTS DE COURS

Ce guide de fin de premier cycle universitaire doit vous permettre d'acquérir un certain nombre de savoirs concernant, les modèles de liaisons avec des exemples, les deux fonctions techniques de base (Étanchéité et Lubrification), ainsi que les liaisons à roulements et les roulements comme organes techniques des machines.

Ces connaissances et compétences que vous allez acquérir doivent vous éclairer pour les dossiers que vous aurez à rendre en fin d'apprentissage de l'Analyse de l'Existant Technique.

Quatre niveaux seront ainsi définis :

⇒ **Niveau 1 : information.** On attend seulement que vous ayez entendu parler du sujet (par exemple les bielles et vilebrequin pour le système bielle-manivelle). **Rassurez vous, nous n'en resterons pas là en Licence**.

⇒ **Niveau 2 : expression.** On attend que vous sachiez utiliser le vocabulaire du cours et des Bureaux d'Études correctement et à bon escient. Attention le vocabulaire s'exprime par des mots mais aussi par des schémas ou dessins à main levée : savez-vous dessiner à main levée, correctement, un roulement à contact oblique ?

⇒ **Niveau 3 : maîtrise des outils.** Vous devez savoir mettre en œuvre un modèle que l'on vous désigne. Par exemple, calculer la durée de vie d'un roulement (en s'aidant d'un catalogue constructeur) à billes à contact radial soumis à des charges axiales et radiales.

⇒ **Niveau 4 : maîtrise méthodologique.** Vous devez savoir poser un problème technique et choisir des outils pour le résoudre. Par exemple, le choix et le montage d'une étanchéité pour une roue motrice de moissonneuse batteuse.

Chaque niveau contient le précédent.

Vous devrez atteindre au moins le **niveau 3**, souvent le **niveau 4**. La bibliographie vous indique quels ouvrages vous permettront une remise à niveau pour le **niveau 2**.

Ce parti est pris car on peut apprendre pour comprendre ou bien apprendre pour agir et pas seulement pour comprendre le monde qui nous entoure.

Plan du Guide

1 Les Liaisons en Mécanique
2 La liaison Pivot Lisse
3 La liaison Pivot sur roulement
4 La liaison glissière sur roulement
5 La fonction étanchéité
6 La fonction lubrification

Les parties 3 à 6 sont sur des fichiers différents

Partie 1 : Les Liaisons en Mécanique

1 Introduction

L'appréhension de la notion de liaison est fondamentale pour l'étude mécanique d'un système en vue des différentes études complémentaires, définies par les axes suivants :

- Analyse de la structure du mécanisme
- Recherche de la loi entrée sortie
- Analyse dynamique et énergétique
- Dimensionnement des pièces et choix technologiques des composants ou éléments de liaison.

2 Point de vue conception mécanique (Technologique)

On dit que deux solides sont en liaison, lorsqu'il y a contact entre ces deux solides et que ce contact reste effectif au cours du temps.

Il faut remarquer que l'évaluation du comportement du contact entre deux solides ne peut se faire que par l'expérimentation : toutefois, en posant les hypothèses adéquates, nous pourrons déterminer analytiquement un modèle prévisionnel de comportement (en général les géométries seront simples).

Ces liaisons feront l'objet d'une représentation sous forme de graphe, appelé graphe des contacts (ou des liaisons), ou d'une représentation schématique normalisée (schéma cinématique minimal), voir d'autres schémas non normalisés comme le schéma d'architecture, le schéma structural ou schéma technologique.

Ces deux derniers nous permettront de déterminer les efforts et d'agencer spatialement les différentes liaisons et éléments composants le mécanisme sous différentes contraintes (rigidité, masse, encombrement…).

3 Point de vue mécanique

Nous formulerons les hypothèses fortes suivantes :

- Un solide reste indéformable au cours du temps
- Les liaisons restent immuables au cours du temps.

La liaison entre deux solides peut être considérée comme un modèle de comportement, et l'aspect cinématique d'une liaison sera privilégiée. Comme vous l'avez vue lors du TD, la

nature des surfaces de contact associée aux mouvements possibles entre ces solides, nous permettra de faire un choix éclairé du modèle de liaison.

Toutefois on distingue les liaisons usuelles, classées en fonction de leur degré de liberté et normalisée, et les liaisons plus complexes pour lesquelles les modèles de comportement sont multiples et choisis en fonction de l'objectif poursuivi. On peut les classer en fonction de leur complexité, en partant du modèle élémentaire de liaison parfaite :

- Contact parfait, sans jeu et sans frottement
- Prise en compte du frottement
- Prise en compte des jeux
- Prise en compte des déformations.

Pour ce qui vous concerne, cette année, nous nous limiterons aux deux premiers cas. Pour le cas des liaisons avec frottement, se reporter au site de Wikipédia.

4 Analyse d'un mécanisme

Toute étude débute par une analyse cinématique menée de la manière suivante.

À partir d'un mécanisme réel ou de sa représentation

Lecture et décodage : Recherche des solides en encastrement
Dénombrement des ensembles cinématiquement équivalents.

Élaboration du graphe des contacts :

Choix des modèles cinématiques :
Mise en évidence des caractéristiques géométriques

Recherche des liaisons équivalentes : Cf. paragraphe 6

Élaboration du schéma cinématique

Paramétrage en vue d'obtenir la loi d'entrée sortie

À partir de la donnée d'un schéma cinématique

Lecture et décodage : Elaboration du graphe des liaisons

Analyse de chaque solide :
(Sommet du graphe) — Définitions des caractéristiques géométriques propres au solide considéré

Analyse de chaque liaison :
(Arc du graphe) — Définition des paramètres géométriques de mise en position d'un des deux solides par rapport à l'autre.
Écriture éventuelle du torseur cinématique associé et- ou du torseur des actions transmissibles par la liaison.

5 Normes en cours, Cf. AFNOR

Mai 1995 : NF EN ISO 3952-1

1 Mouvement des solides et des mécanismes
2 Liaisons de deux solides
3 Solides et leurs composants
4 Mécanismes articulés et leurs composants

NF EN ISO 3952-2

5 Mécanismes à friction et à denture
6 Mécanismes à cames

NF EN ISO 3952-3

7 Mécanismes à croix de Malte et à rochet
8 Accouplements, embrayages et freins

Fév. 1998 : NF EN ISO 3952-4

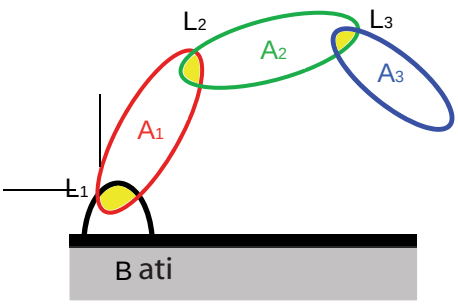
Symboles graphiques pour schémas cinématiques relatifs aux mécanismes divers et à leurs composants (transmissions, courroies, volants, paliers etc..)

6 Quelques notions sur les chaînes de solides

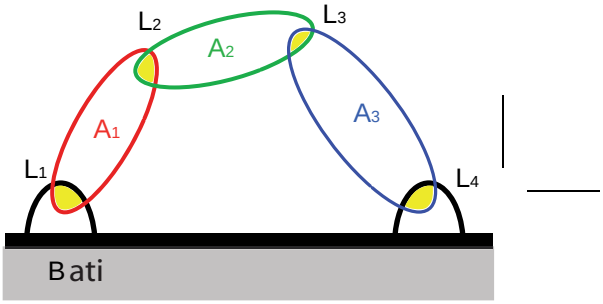
Les chaînes de solides

A partir du graphe des liaisons (ou d'une schématisation équivalente), nous pouvons définir deux types de chaînes à partir du graphe des liaisons :

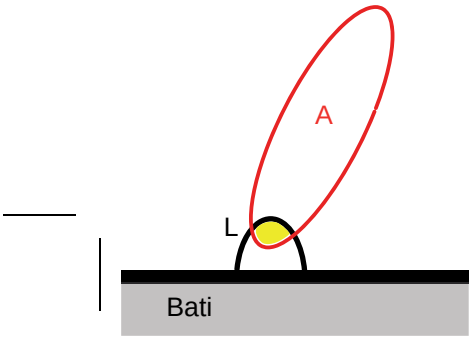
Chaîne continue ouverte
(Exemple : robot, bras de pelleteuse)



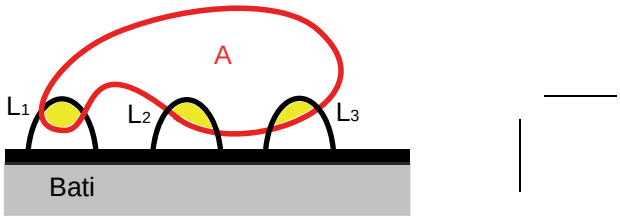
Chaîne continue fermeé
(Mécanismes de transformation de mouvement)



Liaisons en série



Liaisons en paralèlles



Quelques définitions :

On appelle chaîne continue ouverte une chaîne de n+1 solides assemblés par n liaisons en série.

On appelle chaîne fermée une chaîne ouverte dont les deux solides extrêmes ont une liaison entre eux. Les n+1 solides sont reliés par n+1 liaisons.

Une chaîne complexe est une chaîne cinématique constituées de plusieurs chaînes fermées imbriquées : pour ces chaînes complexes, on définit le nombre cyclomatique (vient de la théorie des graphes). On montre par la théorie des graphes que le nombre de chaînes continues indépendantes est $\gamma = l-n+1$

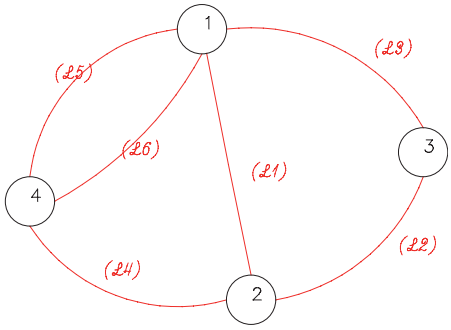
Avec l le nombre de liaisons et n le nombre de solides

γ est appelé le nombre cyclomatique

La connaissance du nombre cyclomatique est intéressante car elle permet de définir le nombre minimal de chaîne à étudier pour décrire le mécanisme.

Exemple simple :

(L1) : liaison glissière d'axe x ;
(L2) : appui plan de normale x ;
(L3) : liaison hélicoidale d'axe (O,y) ;
(L4) : pivot glissant d'axe (O,y) ;
(L5) : linéaire rectiligne d'axe (I,y) de normale x ;
(L6) : appui plan de normale y



Pour le mécanisme ayant le graphe de liaison ci-contre :

n = 4 **l = 6** **γ = 3**

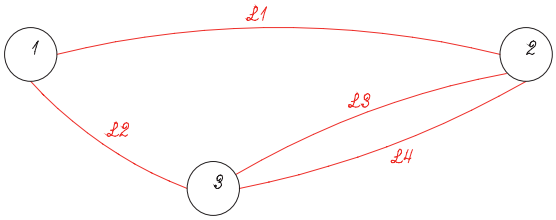
La chaîne comporte deux chaînes indépendantes.

Liaisons cinématiquement équivalentes

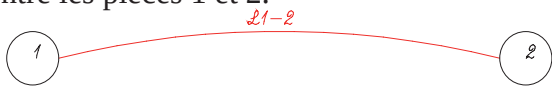
On appelle liaison cinématiquement équivalente entre deux pièces, la liaison qui se substituerait à l'ensemble des liaisons réalisées entre ces deux pièces avec ou sans pièce intermédiaire.

La liaison équivalente est la liaison qui a le même comportement que cette association de liaison, c'est à dire qui transmet la même action mécanique et autorise le même mouvement.

Soit un mécanisme dont le graphe des liaisons est le suivant.



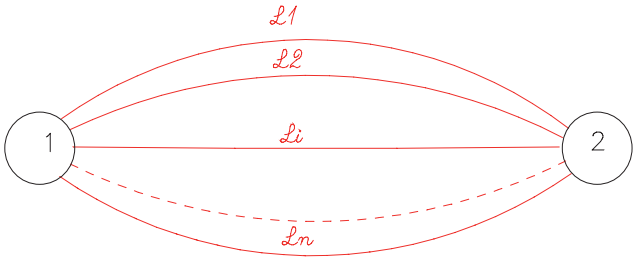
La liaison (L1-2) est la liaison équivalente entre les pièces 1 et 2.



1. Liaisons en parallèle

a) définition:

n liaisons sont disposées en parallèles entre deux solides si chaque liaison relie directement chaque solide.



b) Liaison équivalente

Le torseur cinématique de la liaison équivalente doit être compatible avec tous les torseurs cinématiques des liaisons entre les pièces.
soient :

$\{V\}$ Torseur cinématique de la liaison équivalente

$\{V_i\}$ Torseur cinématique de la liaison Li

$\{V\}=\{V_i\}$ pour tout solide i

c'est à dire

$$\{V\}=\{V_1\}=\{V_2\}=\cdots=\{V_i\}=\cdots=\{V_{n-1}\}=\{V_n\}$$

2. Liaisons en série

a) Définition

Cf. chaîne ouverte

b) Liaison équivalente

Le torseur de la liaison équivalente représente le mouvement du solide Sn par rapport au solide S0.
La relation entre le torseur cinématique de la liaison équivalente s'obtient en écrivant la relation de composition des torseurs cinématiques entre les différentes pièces en présence.

$$\{V_{Sn/S0}\}=\sum_{i=1}^{n}\{V_{Si/Si-1}\}$$

$$\{V_{Sn/S0}\}=\{V_{Sn/Sn-1}\}+\{V_{Sn-1/Sn-2}\}+\ldots\ldots+\{V_{S2/S1}\}+\{V_{S1/S0}\}$$

C'est à dire avec les notations précédentes

$$\{V\}=\{V_1\}+\{V_2\}+\cdots+\{V_i\}+\cdots+\{V_{n-1}\}+\{V_n\}$$

Partie 2 : La liaison Pivot lisse

1 Introduction

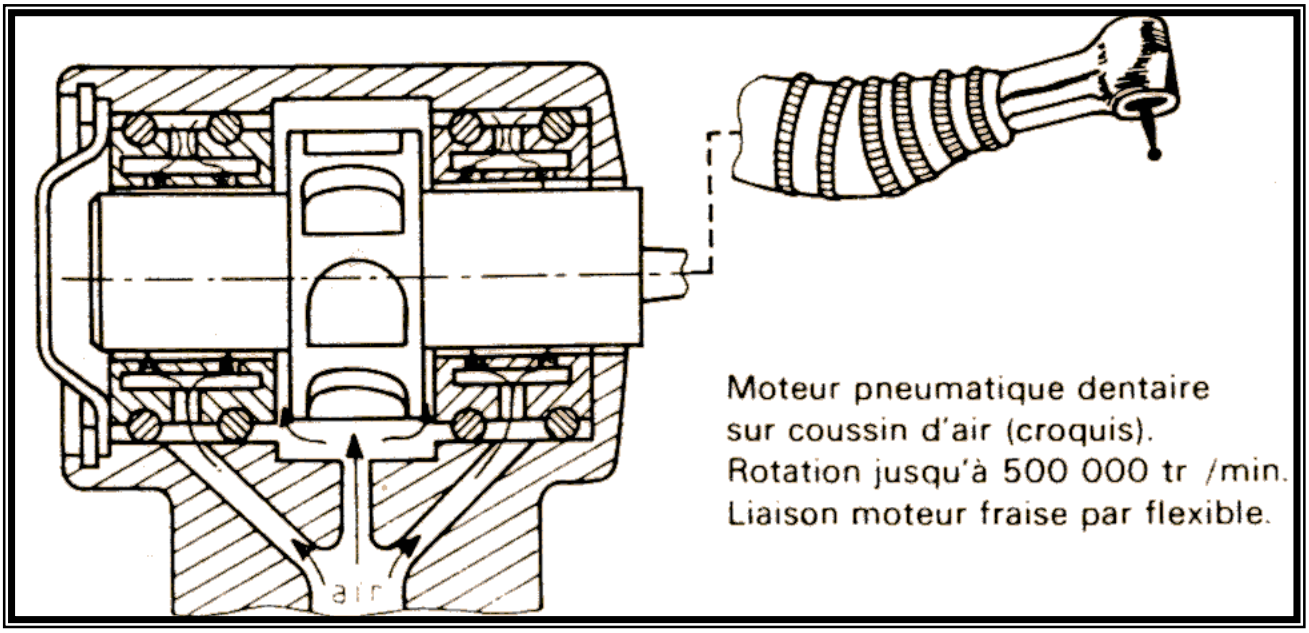
L'objectif du guidage en rotation est de réaliser une liaison pivot ayant des caractéristiques adaptées aux conditions de fonctionnement. La concrétisation d'une liaison pivot entre deux solides passe en général par la réalisation d'un contact entre surfaces cylindriques, donc entre un arbre et un alésage.

Nous pouvons caractériser cinq types de réalisations :

- Contact direct (avec régime de lubrification onctueux)
- Par interposition d'une bague de frottement (avec ou sans lubrification)
- Par interposition d'éléments roulants
- Par interposition d'un fluide (il n'y a plus de contact entre les deux pièces en mouvement)
- Sans contact entre les deux solides (paliers magnétiques)

Les parties par interposition d'éléments roulants seront explicitées dans la partie éléments roulants.

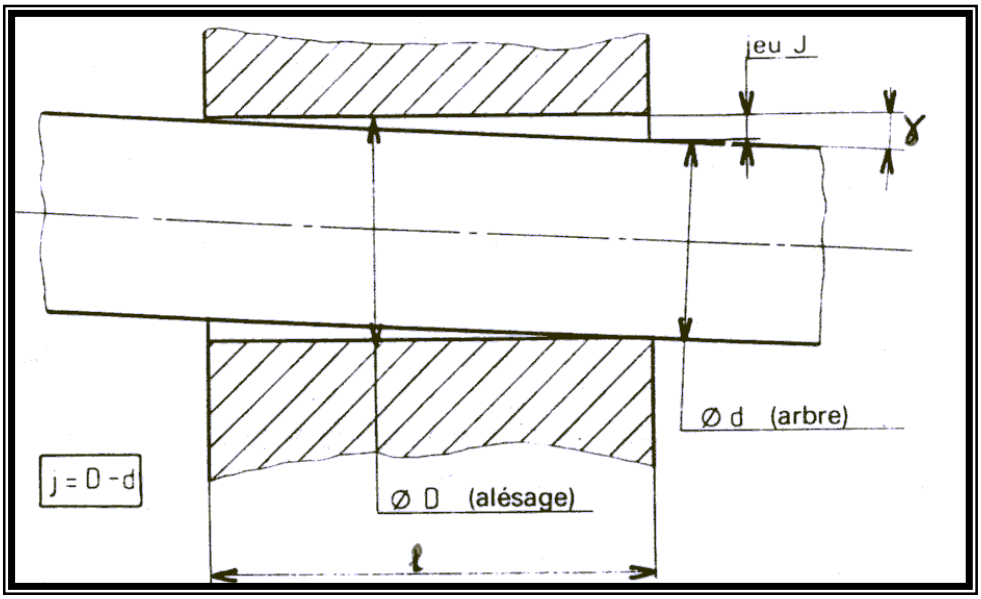
Vous trouverez ci-dessous un exemple de liaison pivot sans contact, pour les paliers avec interposition d'un fluide, cette partie est traitée dans la partie lubrification.



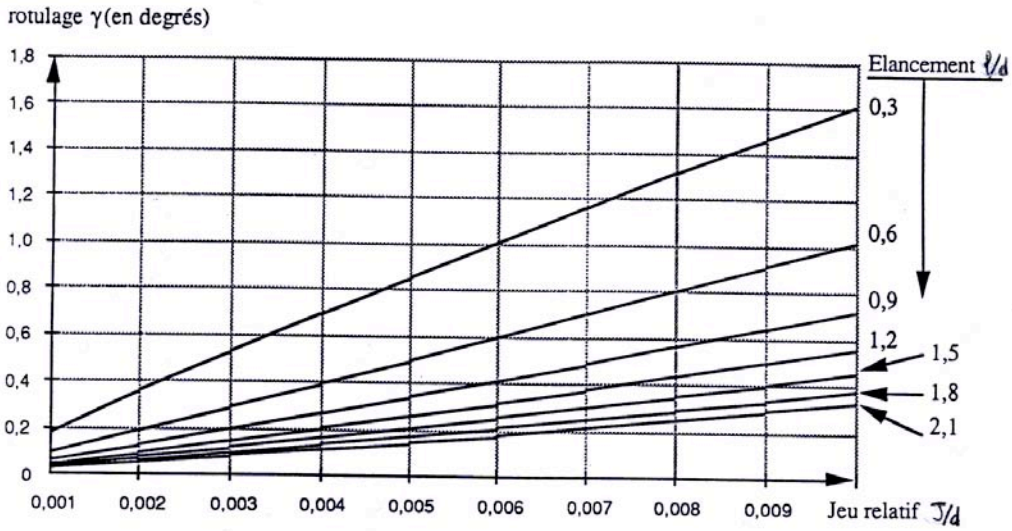
Mais pour des performances acceptables, tant au niveau des efforts supportés que des vitesses de rotation permises, il devient vite nécessaire d'utiliser des matériaux adéquats, avec souvent une lubrification : divers fabricants proposent donc ce que l'on appelle des paliers ou coussinets, de dimensions normalisées, que l'on peut utiliser pour guider des pièces en rotation mais aussi parfois en translation. Dans ce guidage en rotation, il ne faut pas oublier la précision du guidage qui va dépendre essentiellement deux paramètres :

- Jeu entre l'arbre et l'alésage

- Longueur de guidage

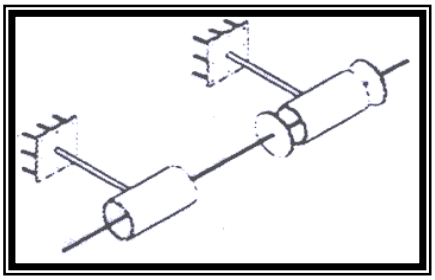


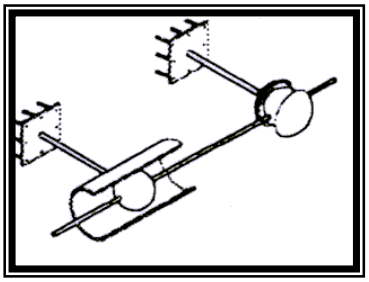
La présence d'un jeu radial entraîne un phénomène de jeu angulaire, appelé **rotulage**.



Sur ce diagramme sont notées les différentes valeurs du rapport l/d qui, pour certains caractérisent le choix d'une liaison pivot (rotulage négligeable), ou d'une liaison rotule, voir linéaire annulaire (rotulage important). La « règle métier qui consistait à dire pour (l/d)>1,5, liaison pivot et pour (l/d)<0,5 liaison rotule » est globalement suivie : par principe il faut toujours évaluer ce rotulage avant toute modélisation.

Souvent, afin d'augmenter la stabilité du guidage, la liaison pivot est réalisée par l'intermédiaire de deux paliers. Deux exemples vous sont proposés ci-dessous :



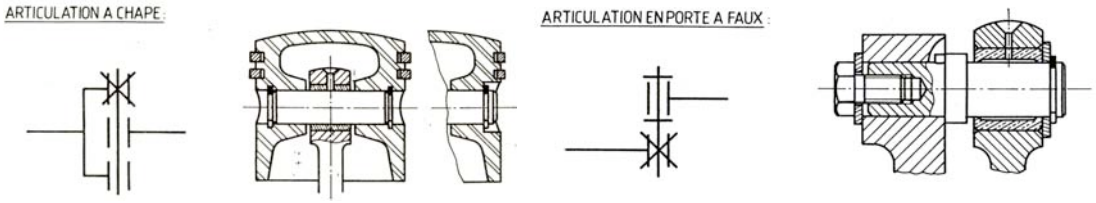


Le premier exemple correspond à un montage **hyperstatique** , le deuxième à un montage **isostatique**.

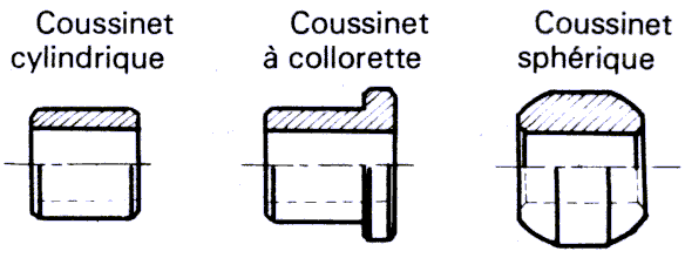
2 Quelques exemples de réalisation

Nous pouvons distinguer deux types de montage :

- Articulation en chape
- Articulation en porte à faux



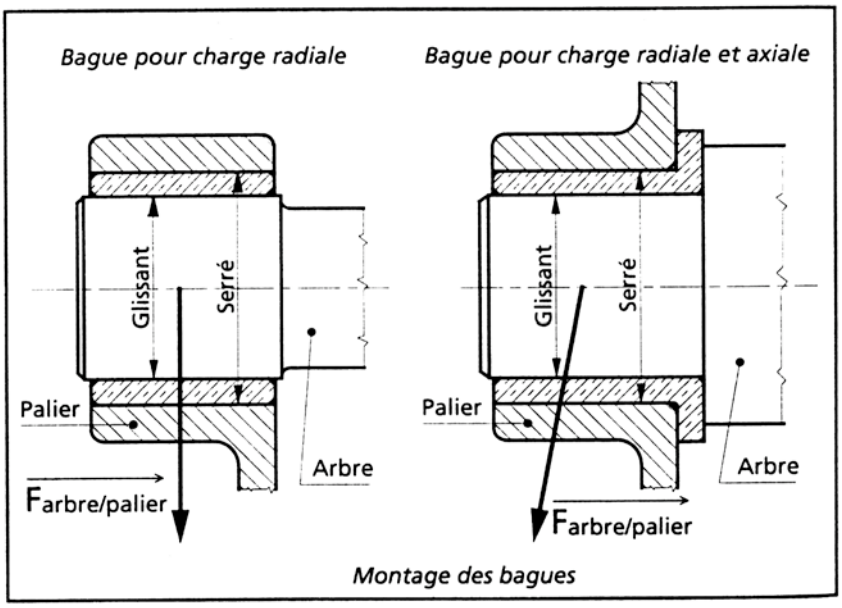
En général, on interpose, entre l'arbre et l'alésage, une pièce appelée coussinet qu' on peut classer géométriquement sous les trois formes suivantes :



Le montage de ces coussinets doit respecter les conditions suivantes :

- Montage de type serré dans l'alésage (pas de mouvements relatifs)
- Montage de type glissant sur l'arbre (mouvement de rotation permis)

En fonction de la résultante des efforts entre le palier et le coussinet, on obtera pour une bague lisse ou une bague à collerette.



A partir de ces trois géométries, les industriels déclinent un nombre important de solutions que nous pouvons classer en 4 types :

A Coussinets nécessitant une lubrification (paliers hydrostatiques)

Ceux ci sont généralement en bronze, ou alliages ferreux, avec des rainures d'amenée du lubrifiant (des exemples vous sont proposés dans la partie lubrification).

Avantages :

Excellente efficacité, y compris au démarrage.

Frottements très faibles donc peu de perte de chaleur

Inconvénients

Mise en œuvre difficile et coûteuse

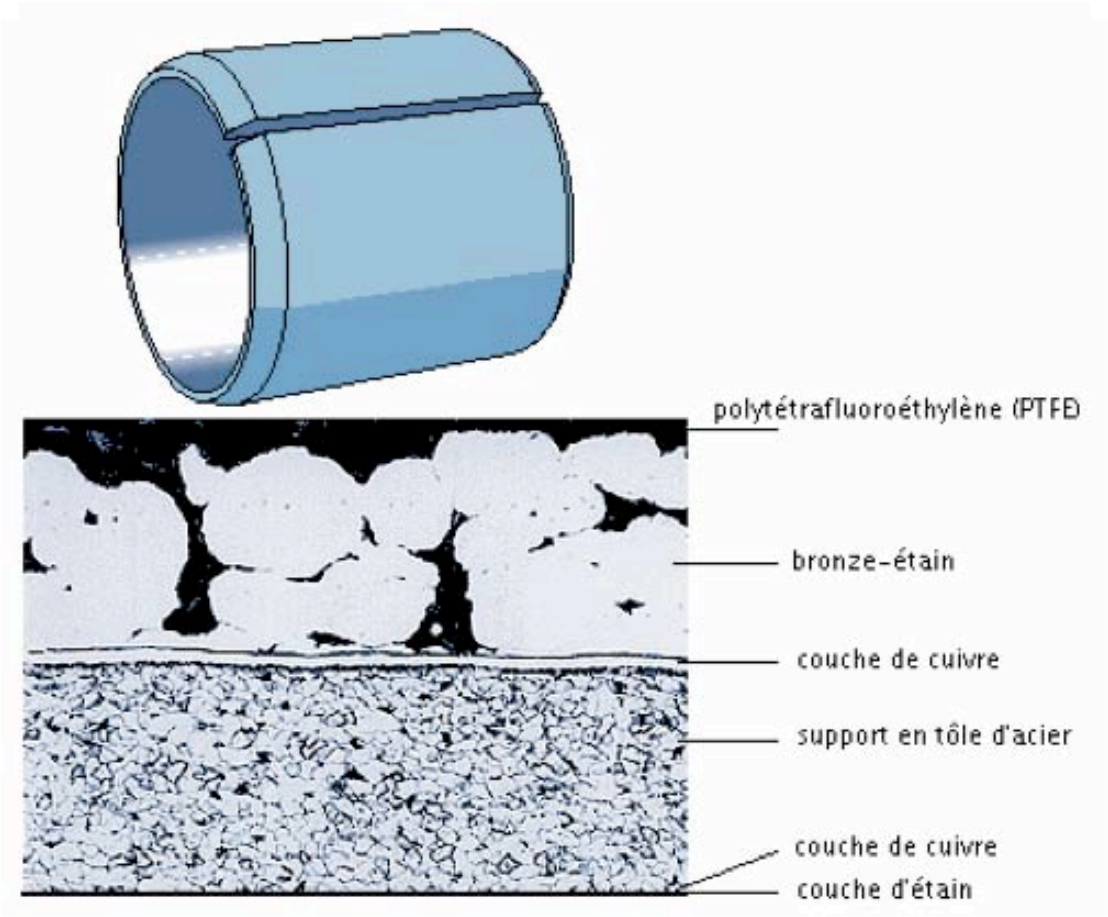
Nécessité d'une pompe externe ainsi que de circuits d'arrivée, de récupération et de filtrage du fluide.

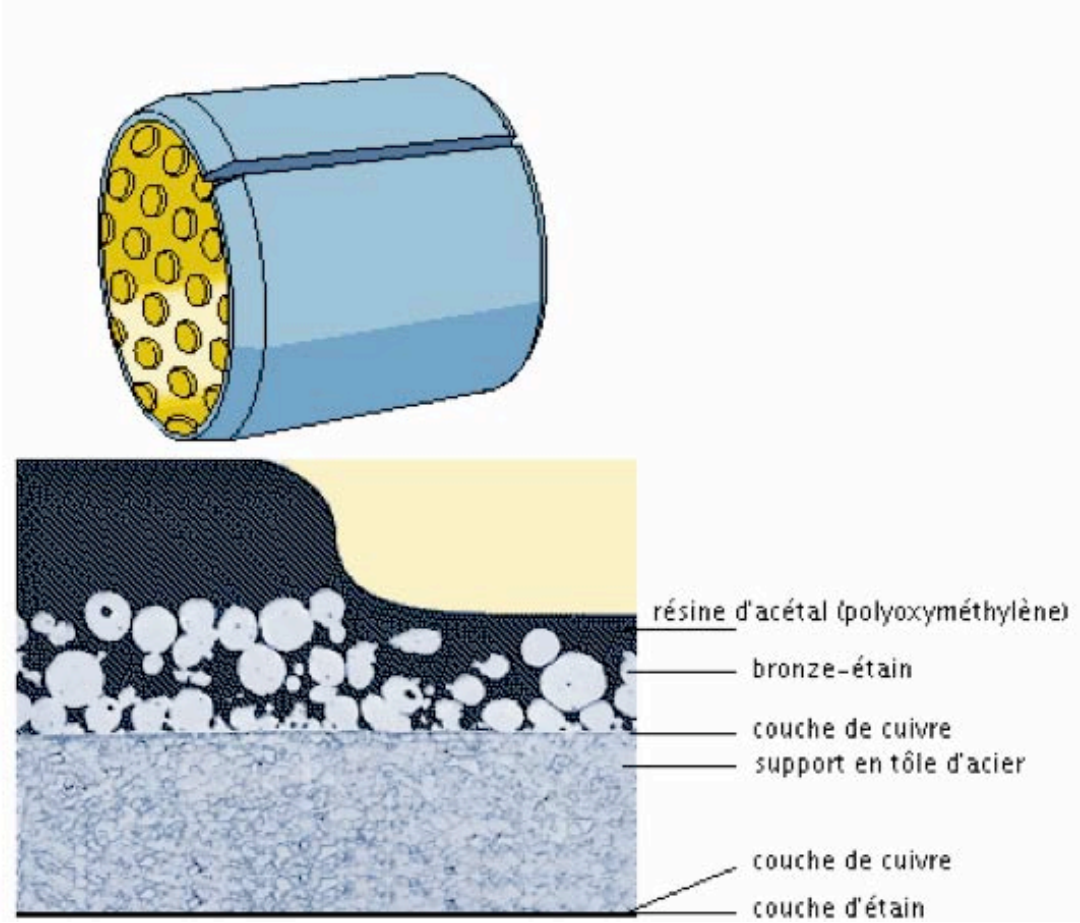
B Coussinets sans graissage

On va jouer sur les matériaux en contact pour faire en sorte que le contact se fasse avec un minimum de frottement. En général, les matériaux employés sont de type :

- carbone-graphite
- PA6-6 (nylon)
- PTFE (téflon)
- PEHD (polyéthylène haute densité)

Deux exemples de réalisation, à partir d'une tôle enroulée avec un revêtement composite sont donnés par la figure ci-dessous : respectivement, **Palier composite SKF B et Palier SKF M**


polytétrafluoroéthylène (PTFE)
bronze-étain
couche de cuivre
support en tôle d'acier
couche de cuivre
couche d'étain


résine d'acétal (polyoxyméthylène)
bronze-étain
couche de cuivre
support en tôle d'acier
couche de cuivre
couche d'étain

3 Les paliers autolubrifiants

Ce sont des paliers qui sont fabriqués par **frittage**, en bronze ou en alliage ferreux et qui ont la particularité d'être **poreux**.

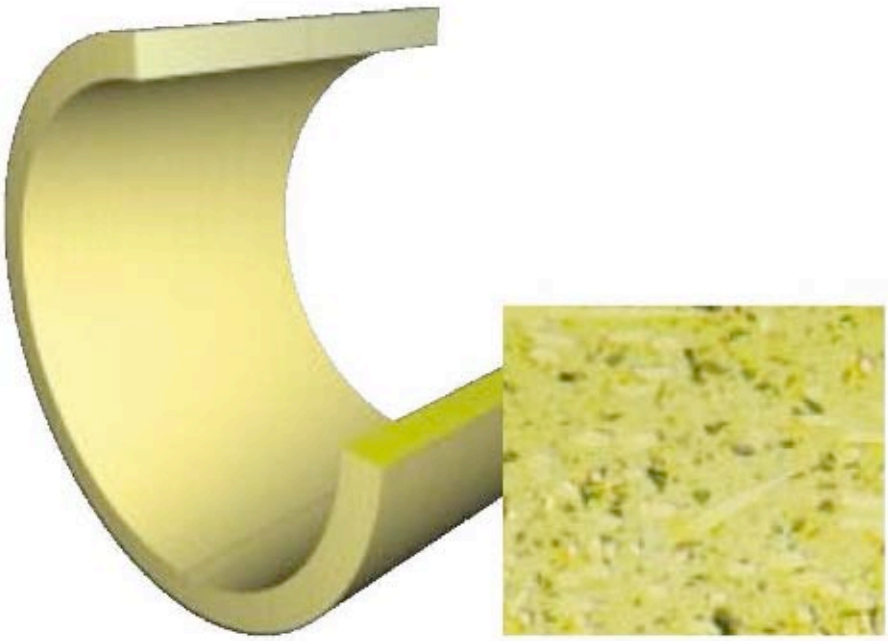
On rappelle que le procédé de **frittage** consiste à obtenir une pièce par compactage de poudres (métalliques ou autres) dans un moule, sous très haute pression et à haute température.

Ils sont livrés imbibés d'huile (15 à 25% du volume, ce qui correspond à la porosité du matériau). Une fois ces paliers installés, l'huile qui est contenue dans le matériau est aspirée lors de la rotation de l'arbre et vient réaliser un film d'huile entre le palier et l'arbre. Elle est réabsorbée par le palier à l'arrêt.

La perte d'huile est inévitable à long terme, mais il est possible, en démontant celui ci, de le recharger dans un bain d'huile chaude.

Ces paliers fonctionnement en régime onctueux à faible vitesse (ou lors de vitesse alternative), mais ils peuvent aussi atteindre un régime fluide, c'est à dire l'équivalent de paliers hydrodynamiques.

Un exemple est donné ci dessous par le Palier **Iglidur IGUS**



Les paliers lisses iglidur® ont une structure homogène. Polymère de base, fibres de liaison et lubrifiants solides se complètent mutuellement.