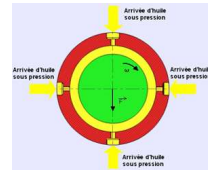


On évite alors le contact direct entre pièces en lubrifiant sous pression la liaison, **c'est le principe du palier hydrodynamique**

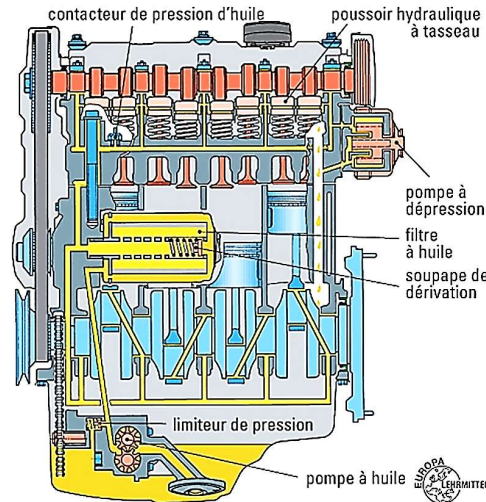
→ Une pompe à huile doit donc être ajoutée à notre moteur !



Certaines liaisons nécessitent donc l'injection d'huile sous pression d'autres sont simplement aspergées d'huile.

On notera la complexité du circuit de graissage. L'huile assure plusieurs fonctions :

- elle lubrifie les pièces en frottement du moteur,
- elle évacue aussi, vers le carter moteur, où elle sera dissipée, la chaleur produite par la friction entre ces pièces.
- elle contient des additifs qui absorbent les sous-produits corrosifs ou nocifs créés par la combustion du mélange carburé dans les cylindres.
- enfin l'huile renforce aussi l'étanchéité aux gaz au niveau des segments des pistons.



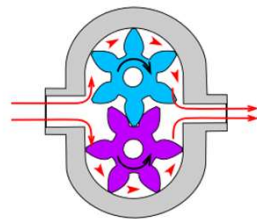
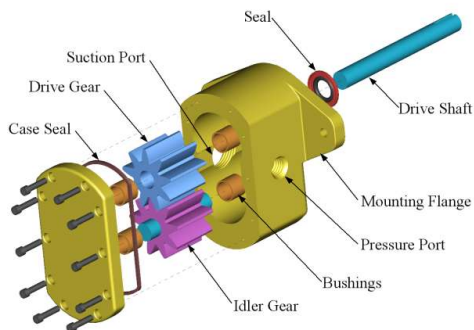
La pompe à huile est typiquement une pompe à engrenage, apte à développer une pression maximale en sortie de 4 à 6 bars et un débit de plusieurs litres par minute.

C'est un mécanisme astucieux et très fiable si l'huile est bien filtrée.

L'arbre de commande de cette pompe est entraîné par le vilebrequin.

Le débit est donc variable, fonction du régime moteur.

Cette pompe indispensable prélève cependant une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre moteur...



Technologie des Machines à Fluides

Dossier 1 - Moteurs thermiques alternatifs à combustion interne

Ce document est une synthèse du cours présenté

Aspect thermodynamique en bref

Dans le cycle ESSENCE du français BEAU DE ROCHAS, inspiré du cycle de LENOIR, encore appelé cycle à volume constant, on trouve deux isochores.

2-3 : l'explosion isochore s'explique par le fait que l'explosion du mélange air - essence est très rapide.

4-1 : lors de l'ouverture de la soupape d'échappement, la pression est égale à la pression extérieure (un gaz parfait est non visqueux). Isochore également.

1-2 et 3-4 : la compression et la détente sont adiabatiques du fait de la rapidité de la course du piston. Le cycle est considéré comme quasi - statique ; la vitesse des molécules d'air est de l'ordre de 700 m/s à 600K, or la vitesse de déplacement du piston = 6m/s << 700 m/s du gaz : la pression a donc le temps de s'équilibrer. Réversibilité → 2 isentropes.

Rudolph DIESEL propose un autre cycle lors de l'exposition universelle de Paris (1900), pour **utiliser de l'huile végétale en guise de carburant**.

Dans ce cycle la compression 1-2 ne s'effectue que sur de l'air avec un **taux de compression plus élevé** (25 contre 10 en essence).

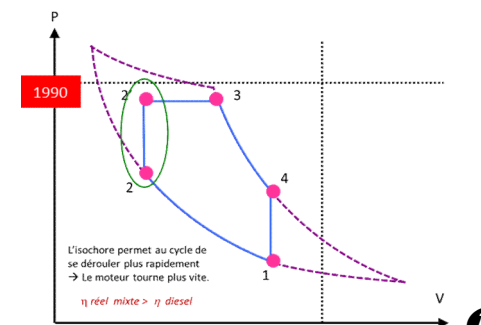
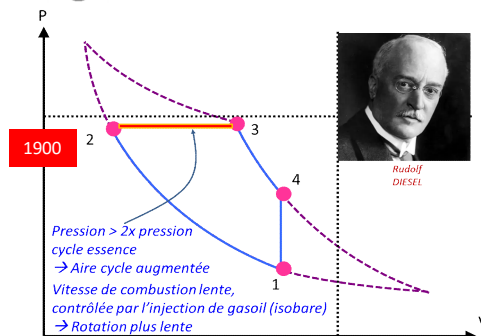
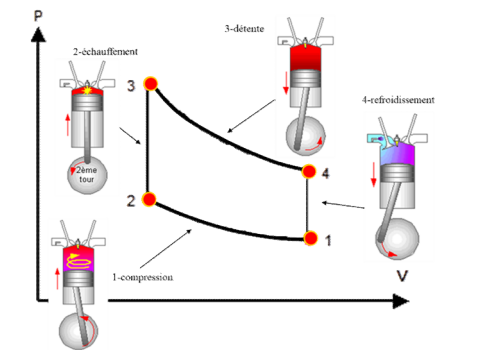
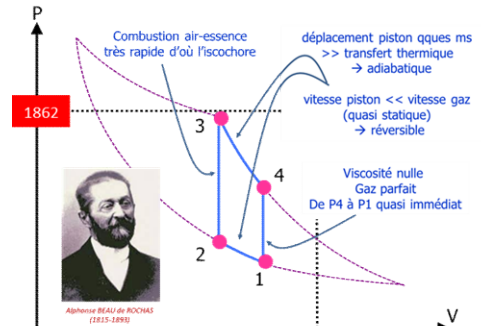
La température T2 est alors plus grande et afin d'éviter une auto-inflammation du mélange on réalise une compression séparée du carburant. Lors de l'injection il y a inflammation immédiate, donc ce système ne comporte pas de bougies d'allumage.

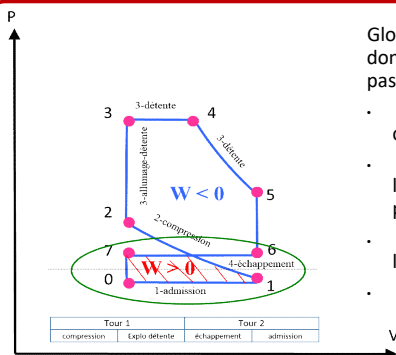
Le temps d'injection est réglé de façon à ce que la transformation 2-3 soit isobare...ceci n'est pas sans conséquence sur la limitation en régime des moteurs diesels qui tournent moins vite que « les essences ».

Pour faciliter le départ à froid en élevant la température des parois de la chambre de combustion et de l'air admis, les moteurs diesel sont équipés de systèmes de préchauffage (appelés **bougies**) ou de réchauffage d'air.

Depuis les années 90 on diminue les temps d'injection grâce à des pompes haute pression très performantes (>2000 bars contre 200-300 bars sinon !!!) autorisant aussi une pulvérisation plus fine et une meilleure combustion.

Ce cycle comporte une combustion partiellement à P cste et à V cste ⇒ **Un moteur de type « HDI ou JTD » tourne donc plus vite qu'un diesel classique.**

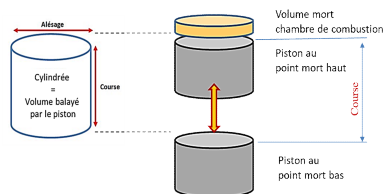




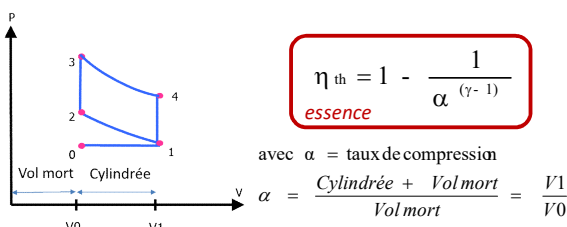
Globalement la masse des gaz varie (admission, échappement), le cycle est donc ouvert et les transformations successives idéales et réversibles ne sont pas réalisables. En effet :

- il y a des pertes de chaleur par les parois du cylindre refroidi en fin de compression (T2 et P2 réels inférieurs à T2 et P2 escomptés),
- il y a des pertes de charges au niveau de l'admission (soupapes) réduisant la pression pendant la phase d'aspiration 0-1 et augmentant la pression en phase d'échappement 6-7 (W>0, de l'énergie est fournie au gaz...),
- la combustion n'est pas instantanée, pour cela on doit provoquer l'inflammation du mélange avant la fin de la compression (3-4),
- les chaleurs massiques Cp et Cv ne sont pas constantes...

La réalisation des 4 temps fait appel à l'exécution de 2 tours de vilebrequin. ⇒ Irrégularité du couple moteur, corrigée, cependant, par l'emploi de plusieurs pistons



$$CYLINDREE = \pi \times \left(\frac{\text{Alésage}}{2}\right)^2 \times \text{course} \times \text{nombre de cylindres}$$

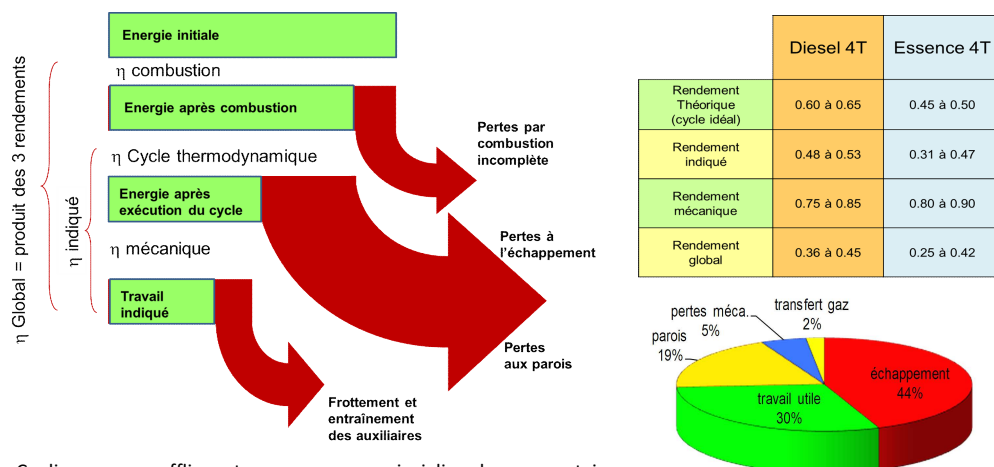


On remarque que le rendement essence est d'autant plus élevé que le taux de compression α est élevé.

Ce qui limite α c'est le phénomène de **détonation** quand par suite de l'élévation de pression et de température une portion du mélange s'enflamme spontanément.

Le **cliquetis**, caractéristique d'une combustion anarchique, est une onde sonore dont l'énergie provoque une brutale surchauffe pouvant aller jusqu'à la destruction des éléments du moteur...

Un indice d'octane élevé limite le phénomène de détonation et permet donc d'augmenter α et donc η .



Ce diagramme « affligeant » se passe, pour ainsi dire, de commentaires.

Disons, en imageant, que pour 100 litres achetées à la pompe, 35 litres sont réellement utiles et 65 litres sont finalement déversés à côté du réservoir...

Ce n'est pas tant l'essence qui est chère, ce sont nos moteurs qui sont peu efficaces !

Pour disposer de plus d'énergie il faut brûler plus de carburant et donc davantage d'air.

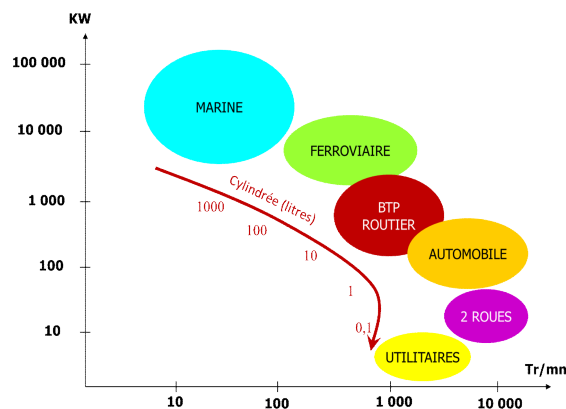
Pour avoir une masse d'air plus importante dans le cylindre, on peut diminuer sa température, augmenter sa pression, augmenter son volume.

Etant donné qu'on ne peut pas augmenter à l'infini la cylindrée unitaire, **il faut multiplier le nombre de cylindres**.

Plus on a de cylindres, plus le couple sera régulier et sa moyenne élevée.

Si on parle des moteurs atmosphériques (non suralimentés), il est donc normal que les moteurs puissants aient une grosse cylindrée et un nombre de cylindres important.

Il ne faut donc pas uniquement que le moteur fournisse du couple, il faut qu'il puisse tourner relativement rapidement pour être puissant ($P = C \cdot \omega$)...



Il faut noter qu'un moteur à fortes dimensions tourne lentement, à l'inverse un moteur qui tourne très vite sera de faibles dimensions.

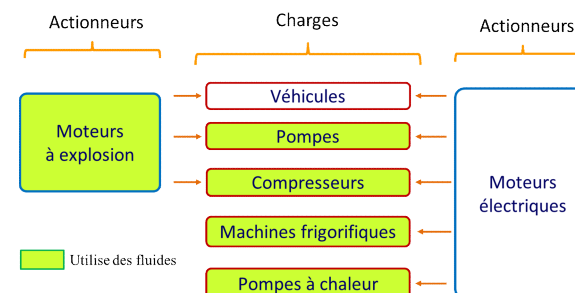
Ce constat est généralisable à tous les systèmes mécaniques.

Quelques éléments de contexte

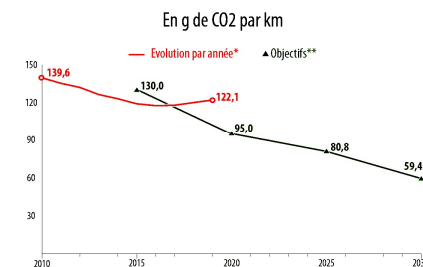
Concernant l'automobile, globalement depuis 1994 les émissions de CO2 n'augmentent plus au même rythme que la circulation, tant l'efficacité énergétique des moteurs a été améliorée.

Les constructeurs déploient des solutions techniques de plus en plus fouillées pour respecter les rejets voulus par l'UE mais un plafond semble être atteint du côté des moteurs à explosion (d'où la falsification des données constructeurs...).

On estime que 80 % des automobiles dans le monde seront encore équipées de moteurs thermiques à l'horizon 2035, dans des voitures purement thermiques ou bien hybrides.



ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DE CO2 DES VOITURES PARTICULIÈRES NEUVES

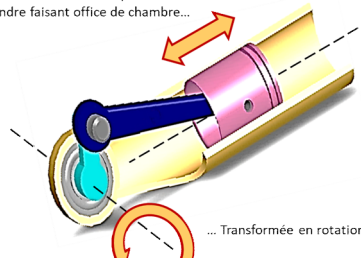


* Estimé pour 2010, 2011 et 2012
 ** Objectifs indicatifs calculés par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) conformément au règlement (UE) 2019/631.
 Sources : Eurostat (sdg_12_30); Agence européenne pour l'environnement (AEE), 2021

Dans les machines à fluides le moteur à explosion sera encore utilisé à long terme...

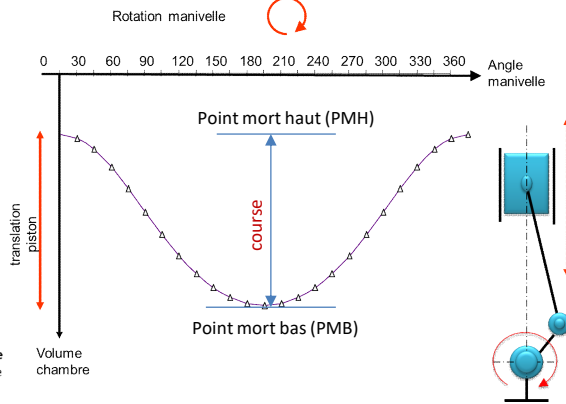
Constitution

Translation alternée du piston dans un cylindre faisant office de chambre...



... Transformée en rotation continue.

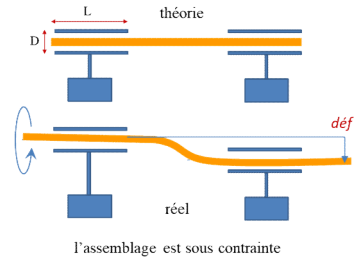
→ c'est le **système bielle manivelle** utilisé comme mécanisme de transformation de mouvement.



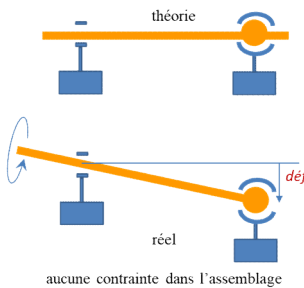
Mobilités dans le système

Réalisation d'une liaison pivot

Montage hyperstatique



Montage isostatique



Dans le montage de gauche il est impossible de fabriquer 2 liaisons parfaitement coaxiales. Aussi l'arbre doit être contraint pour compenser le défaut et être monté dans le moyeu.

Dans le montage de droite, ce sont les libertés laissées par les liaisons qui permettent de compenser le défaut. L'arbre est monté dans le moyeu sans contrainte...

→ **Le choix des liaisons au moment de la conception est déterminant.**

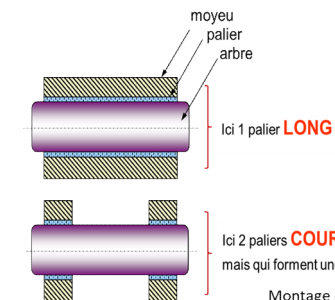
De nombreuses liaisons dans un moteur utilisent des paliers.

Un palier est un élément rapporté entre arbre et moyeu.

Assurant le guidage de l'arbre dans le moyeu, il fait aussi office de « fusible mécanique ».

C'est-à-dire que la détérioration de la liaison lors d'une avarie concerne le palier uniquement, arbre et moyeu restent généralement indemnes.

Le palier est peu onéreux et se remplace.



1' = 1 minute d'arc
soit 1/60 de degré.

Le jeu dans une liaison mécanique précisément ajustée est égal, en première approximation, au diamètre sur 2000, $j \approx D/2000$

Par exemple, un arbre de diamètre 20 mm pourra fonctionner correctement dans un moyeu de diamètre 20,01 mm (soit un jeu de 10 microns).

On montre alors facilement qu'avec un jeu de cet ordre de grandeur, la qualité du guidage de l'arbre dans le moyeu, qui tient compte de l'angle de boîtement de l'arbre α , est fonction du rapport L/D (facteur de forme du palier).

$$\tan \alpha = j/L = D/2000/jL = D/2000L$$

$$L/D = 1/(2000 \cdot \tan \alpha)$$

$$AN = L/D = 1/[2000 \cdot \tan(1/60^\circ)] = 1,7$$

Typiquement, si $L/D > 1,5$, le guidage est supposé long et le boîtement est alors négligé.

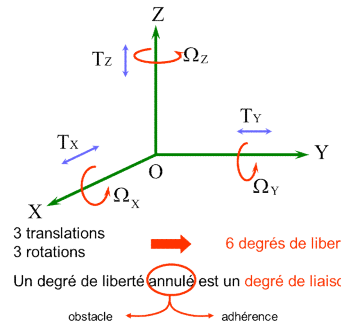
Si non, le boîtement doit être pris en considération dans les mouvements possibles de l'arbre...

Ainsi, si $L/D > 1,5$ on parle de liaison pivot, pivot glissant, glissière.

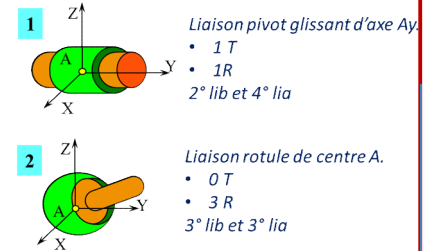
Si non $L/D < 1,5$ on parle de liaison rotule ou linéaire annulaire.

$$j = D/2000$$

Boîtement α
non comptée si
 $\alpha < 1'$



Une liaison mécanique admet des degrés de liberté et des degrés de liaison. Le degré de liaison annule le degré de liberté. Pour ceci on utilise soit un obstacle, soit l'adhérence, ou bien les deux en même temps...



Dans l'exemple 1, il s'agit d'une liaison pivot glissant, comptant 1 rotation et 1 translation. Donc 2 degrés de liberté et 4 degrés de liaison.

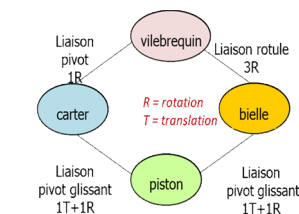
Dans l'exemple 2, il s'agit d'une liaison rotule, comptant 3 rotation et 0 translation. Donc 3 degrés de liberté et 3 degrés de liaison.

L'architecture de moteur proposée ici admet des variantes selon les constructeurs.

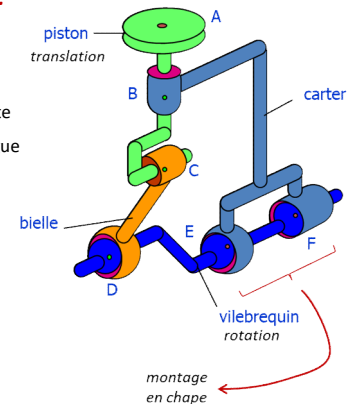
La nature des liaisons est déterminée en calculant le rapport longueur/diamètre = L/D de chaque liaison, en considérant les longueurs et diamètres des guidages.

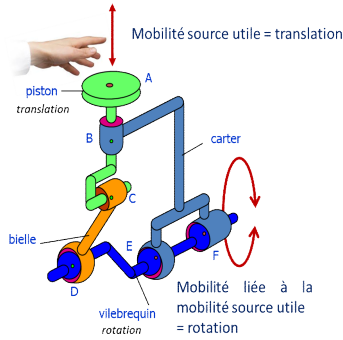
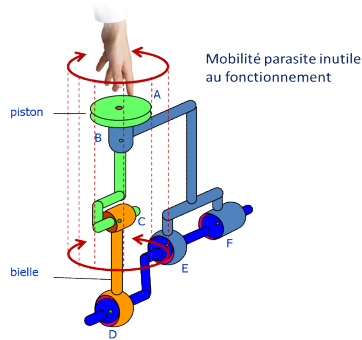
Ce critère n'est pas valable dans la liaison piston cylindre, car la dilatation du piston réduit énormément le jeu → ce guidage là est de qualité et se comporte comme une liaison longue.

- jeu # D/2000
- Bielle/piston → $L/D > 1,5$ liaison longue
- Bielle/vilebrequin → $L/D < 1,5$ liaison courte
- Vilebrequin/carter → $L/D > 1,5$ liaison longue
- jeu → 0 (dilatation)
- Piston/carter → liaison longue



Grappe des liaisons





On observe (c'est plus facile à imaginer quand A, C et D sont alignés) que le piston et la bielle sont libres de pivoter **ensemble** autour de l'axe vertical.

Ceci s'explique par le fait que la liaison en A et celle en D ont un **axe de rotation commun** (l'axe vertical).

La liaison en C ne faisant que transmettre ce mouvement d'une pièce à l'autre.

Ce mouvement, à priori **inutile**, est appelé **mobilité parasite**.

Il peut exister (généré par des vibrations par exemple) mais il peut aussi être nul sans nuire au bon fonctionnement. Sa valeur n'est pas importante, on peut lui donner la valeur zéro.

En revanche, la translation du piston, en tant que mouvement source du système, est fondamentale et on l'appelle **mobilité utile**.

C'est elle qui provoque la rotation du vilebrequin.

Le choix et l'agencement des liaisons obéit en fait à des **règles strictes** pour garantir un montage et un fonctionnement sans surprise.

Le mécanisme doit notamment être **isostatique** \Leftrightarrow **tous les mouvements possibles entre pièces doivent pouvoir être calculés à partir du mouvement source par les lois de la cinématique**.

4 liaisons = 6x4 paramètres = 16 degrés de liaison + 8 degrés de liberté

Parmi ces 8 degrés de liberté on a 1 mouvement source utile (translation piston) et 1 mouvement inutile (rotation propre piston) imposé par exemple à 0 \rightarrow Il reste 6 mouvements inconnus,

1 loi de composition des vitesses écrite avec les torseurs cinématiques offre **6 équations**.

$$\begin{aligned} V1/2 + V2/3 + V3/4 + V4/1 &= V1/1 = 0 \\ \omega 1/2 + \omega 2/3 + \omega 3/4 + \omega 4/1 &= \omega 1/1 = 0 \end{aligned}$$

2 équations vectorielles
soit 2*3 = 6 équations scalaires (projections)

6 inconnues, 6 équations \rightarrow le mécanisme est bien isostatique.

Pression de contact dans les liaisons



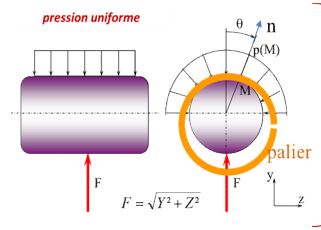
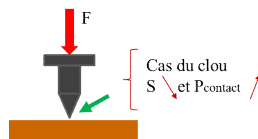
L'effort F issu de l'explosion se répercute sur les pièces, et, appliqué sur les liaisons, provoque des champs de pression sur les surfaces de contact.

La pression de contact doit rester inférieure à une limite admissible P_{adm} , valeur au-dessus de laquelle la surface du matériau constitutif est marquée (exemple du clou), ce qui provoque la détérioration immédiate du palier.

La valeur P_{max} est naturellement fonction de l'allure du champ de pression.

L'allure la plus simple (pression uniforme) est ici retenue. C'est le modèle conventionnel.

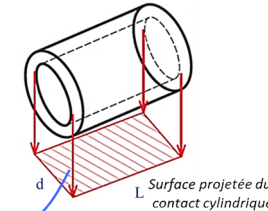
P_{adm} est par ailleurs fournie par les constructeurs de paliers.



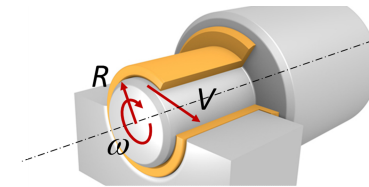
Effort centré sur le contact
Pression uniforme partout
Modèle conventionnel de référence

$$P_{max} = \frac{F}{L \cdot d} \leq P_{adm}$$

- coussinet en bronze lubrifié $\Rightarrow P_{adm} \# 50 \text{ Mpa}$,
- coussinet autolubrifié en métal fritté $\Rightarrow P_{adm} \# 25 \text{ Mpa}$,
- coussinet en plastique phénolique lubrifié $\Rightarrow P_{adm} \# 20 \text{ Mpa}$,
- coussinet sans graissage en nylon $\Rightarrow P_{adm} \# 6 \text{ Mpa}$.



Surchauffe et grippage



$$V = \omega \cdot R \quad [m/s]$$

Vitesse tangentielle Vitesse de rotation Rayon palier

Les efforts tangents aux contacts développent un effort ou un couple de frottement qui dissipent une puissance qui ne doit pas dépasser une valeur limite au-delà de laquelle le matériau qui constitue le palier commence à fondre \Rightarrow **c'est le grippage**.

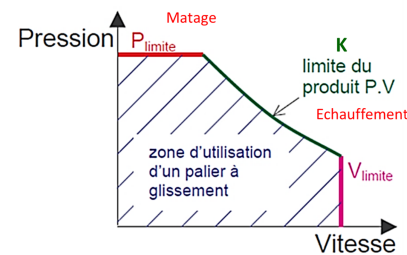
Cette limite est fonction de la pression de contact P et de la vitesse de glissement V ($V = \Omega \cdot R$ si rotation).

Ainsi on doit respecter le critère de non grippage : $P_{max} \cdot V < K$.

K [W/mm^2] est la **puissance aréolaire**.

C'est la puissance maximale par unité de surface que la liaison peut dissiper avant d'être détruite par échauffement. On en déduit la zone d'utilisation d'un palier... K est fournie par les constructeurs des paliers.

- coussinet en bronze lubrifié $\Rightarrow K \# 35 \text{ W/mm}^2$,
- coussinet autolubrifié en métal fritté $\Rightarrow K \# 1.8 \text{ W/mm}^2$,
- coussinet en plastique phénolique lubrifié $\Rightarrow K \# 40 \text{ W/mm}^2$,
- coussinet sans graissage en nylon $\Rightarrow K \# 0.04 \text{ W/mm}^2$.



Les liaisons qui impliquent le vilebrequin supportent des efforts importants conjugués à des mouvements relatifs conséquents \Rightarrow la puissance dissipée par unité de surface (pression de contact x vitesse tangentielle [W/mm^2]) est trop forte pour autoriser un contact direct entre les pièces concernées.

L'échauffement provoquerait le grippage de la liaison.

Le risque est très élevé au niveau :

- de la liaison vilebrequin - carter
- de la liaison bielle - vilebrequin.

