

# MOTEURS THERMIQUES – partie 2a

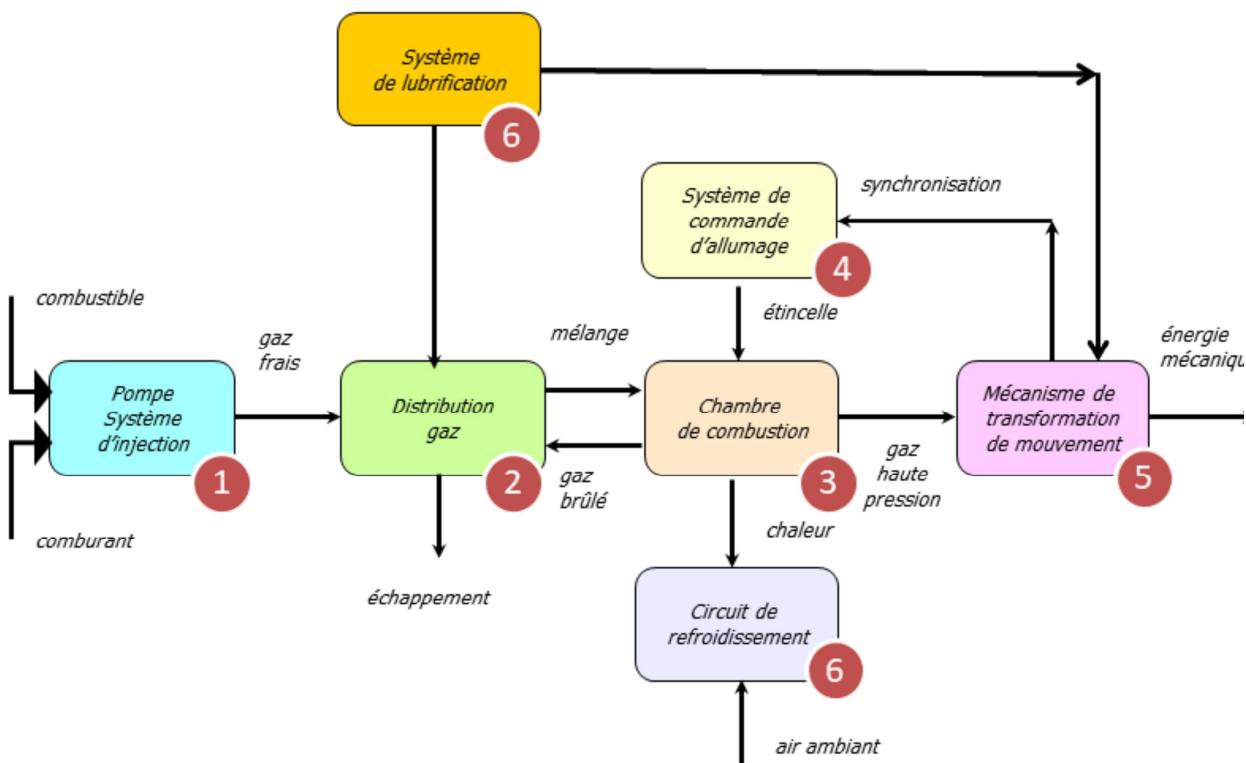
De la conception à la réalisation...



Dans cette partie on étudie la technologie **classiquement** utilisée pour fabriquer un moteur thermique à arbre tournant et pistons alternatifs.

# Eléments constitutifs - essence

- Composition
  - ▶ Eléments constitutifs
- Mécanique
- Mobilités
- Grippage
- Lubrification
  - Circuit & pompe
- Application



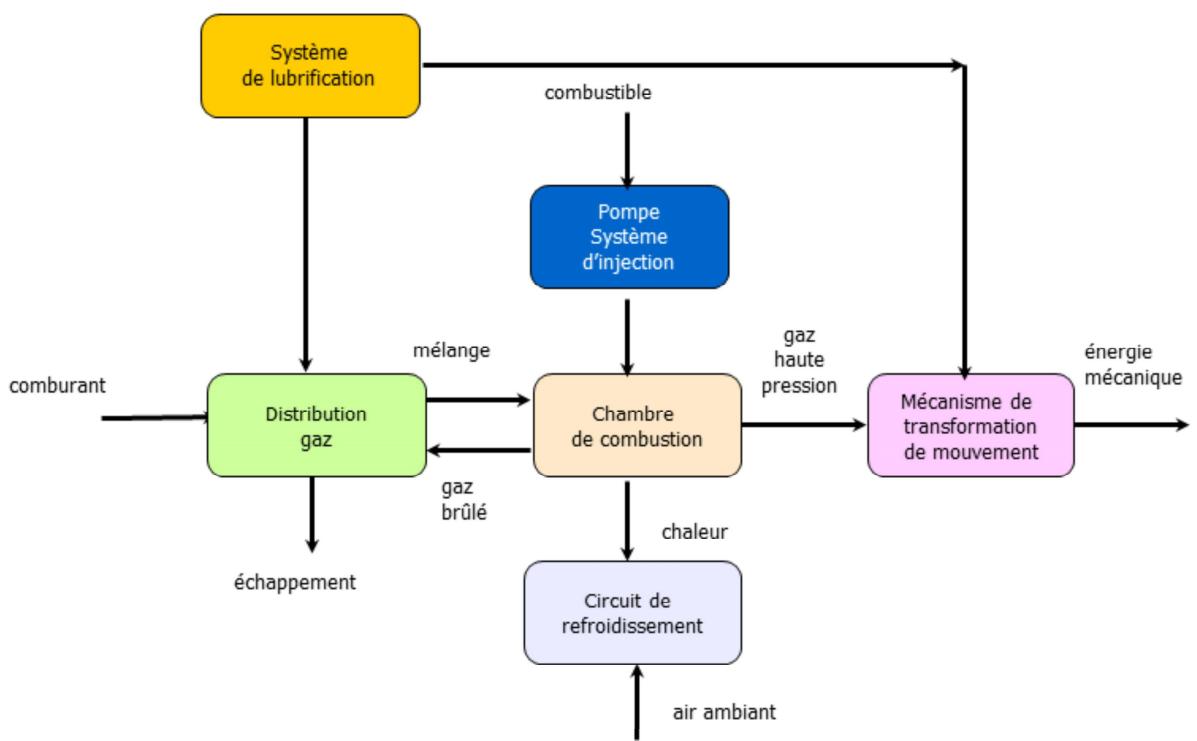
Pour réaliser le cycle Beau De Rochas, les éléments suivants sont nécessaires :

- (1) un système pour préparer le mélange air-essence (système d'injection ou carburateur),
- (2) une distribution permettant de transvaser le gaz au bon moment (importance de la synchronisation),
- (3) une chambre de combustion (piston+cylindre+culasse) capable d'être étanche,
- (4) un système de commande d'allumage pour provoquer l'inflammation du mélange au bon moment (synchronisation),
- (5) un mécanisme de transformation de mouvement capable de transmettre la puissance développée sur le piston à l'arbre du moteur,
- (6) un système de refroidissement pour absorber les pertes calorifiques,
- (7) un système de lubrification pour garantir la tenue mécanique.

⇒ Une avarie sur un seul de ces systèmes peut remettre en cause gravement le fonctionnement du moteur.

# Eléments constitutifs - diesel

- Composition
  - ▶ Eléments constitutifs
- Mécanique
- Mobilités
- Grippage
- Lubrification
  - Circuit & pompe
- Application



Pour réaliser le cycle de Diesel le schéma précédent subit les modifications suivantes :

- suppression du système d'allumage (auto-inflammation),
- modification du système d'injection pour garantir une admission séparée de l'air et du gasoil.

Remarque : même s'il existe des points communs entre les deux schémas on ne peut généralement pas interchanger les pièces car la valeur des efforts en jeu n'est pas la même.

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

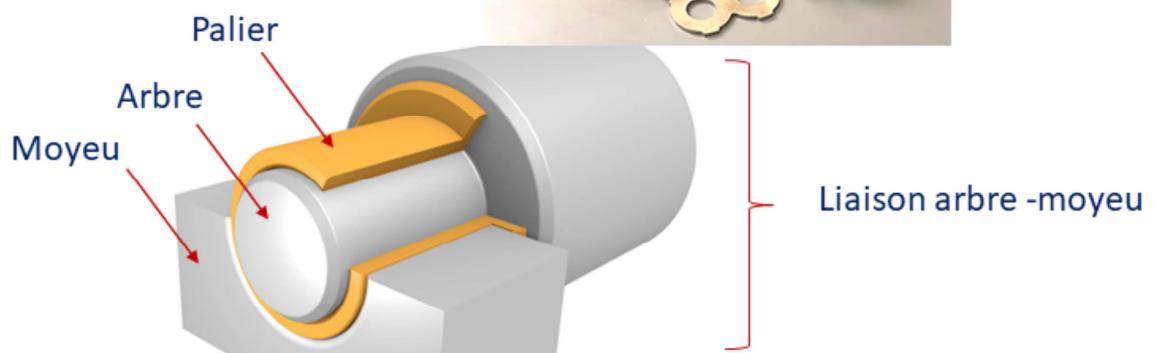
### ► Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



Le **guidage** est assuré par un **palier « rapporté »**.

Le palier est un élément rapporté entre arbre et moyeu.

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

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.

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

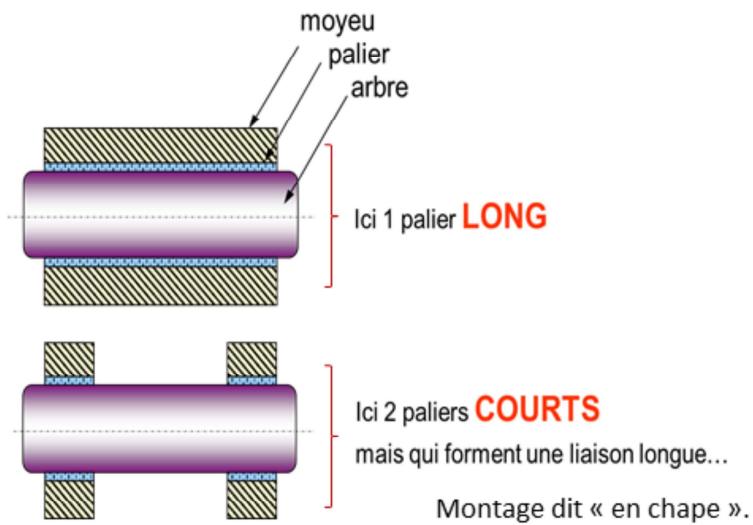
### ► Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



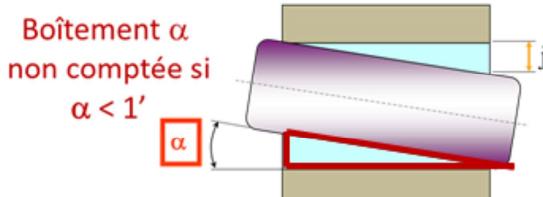
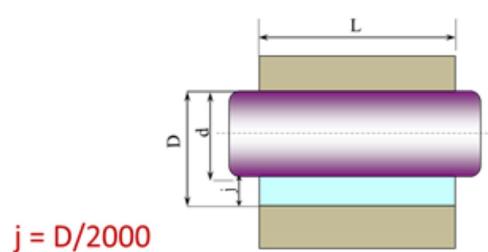
Pour définir si la liaison est longue ou bien courte  
on applique un critère...

Les liaisons mécaniques utilisées en guidage (d'une pièce relativement à une autre) doivent être identifiées avec soin car leurs caractéristiques sont déterminantes sur la viabilité de la conception retenue.

Notamment il est important de savoir quand on a affaire à une liaison dite «longue » ou à une liaison dite « courte ».

# Mobilités

Composition  
Eléments constitutifs  
Mécanique  
► Mobilités  
Grippage  
Lubrification  
Circuit & pompe  
Application



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

Quand  $\alpha$  constitue-t-il un degré de liberté ?

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

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

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

→ Si  $L/D < 1,5$   
le guidage permet **le boîtement**  
La liaison est dite courte.

→ Si  $L/D \geq 1,5$  le guidage est de qualité,  
 $\alpha$  est négligé et la liaison est dite longue.

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

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  $\alpha$ , est fonction du rapport  $L/D$ .

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

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

Ainsi, si  $L/D > 1,5 \rightarrow$  on parle de liaison longue (pivot, pivot glissant, glissière)

Sinon  $L/D < 1,5 \rightarrow$  on parle de liaison courte (rotule, linéaire annulaire).

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

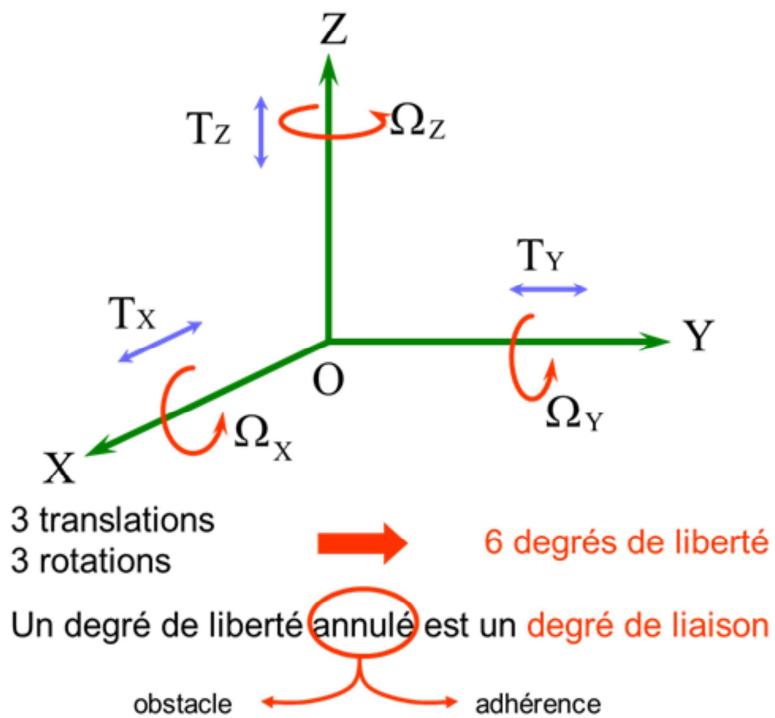
### Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application

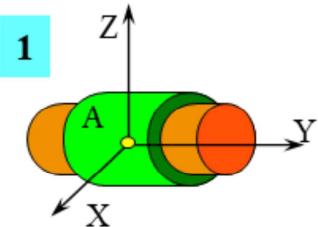


Une liaison mécanique admet des degrés de liberté et des degrés de liaison.

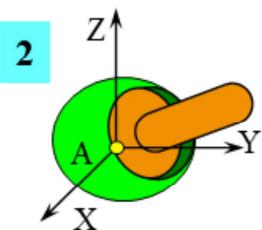
Le degré de liaison annule le degré de liberté. Pour ceci on utilise soit un obstacle, soit l'adhérence, ou les deux en même temps...

# Mobilités

Composition  
Eléments constitutifs  
Mécanique  
▶ Mobilités  
Grippage  
Lubrification  
Circuit & pompe  
Application



*Liaison pivot glissant d'axe Ay.*  
• 1 T  
• 1 R  
2° lib et 4° lia



*Liaison rotule de centre A.*  
• 0 T  
• 3 R  
3° lib et 3° lia

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.

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

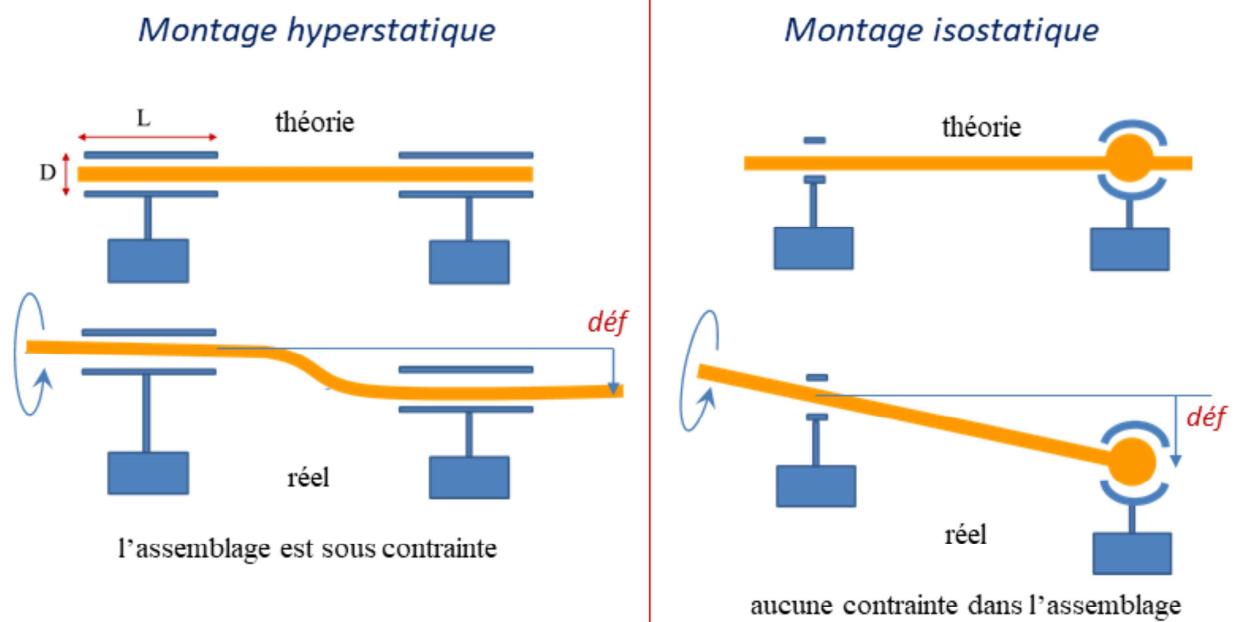
### Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



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

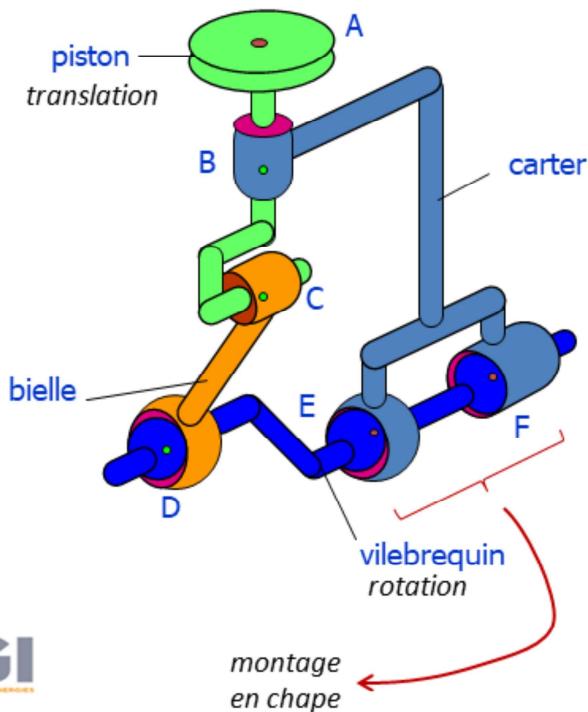
Dans le montage de gauche il est impossible de fabriquer 2 liaisons parfaitement coaxiales. Aussi l'arbre doit être contraint pour compenser le défaut et être monté dans le moyeu.

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...

# Mobilités

Composition  
Eléments constitutifs  
Mécanique  
► Mobilités  
Grippage  
Lubrification  
Circuit & pompe  
Application



jeu # D/2000

Bielle/piston  $\rightarrow L/D > 1.5$  liaison longue

Bielle/vilebrequin  $\rightarrow L/D < 1.5$  liaison courte

Vilebrequin/carter  $\rightarrow L/D > 1.5$  liaison longue

jeu  $\rightarrow 0$  (dilatation)

Piston/carter  $\rightarrow$  liaison longue

Le mécanisme de transformation de mouvement est classiquement un **système bielle-manivelle**.

Il permet de transformer la translation du piston en rotation du vilebrequin tout en transmettant la puissance de façon fiable.

**La solution 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  $\rightarrow$  le guidage est de qualité et se comporte comme une liaison longue.**

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

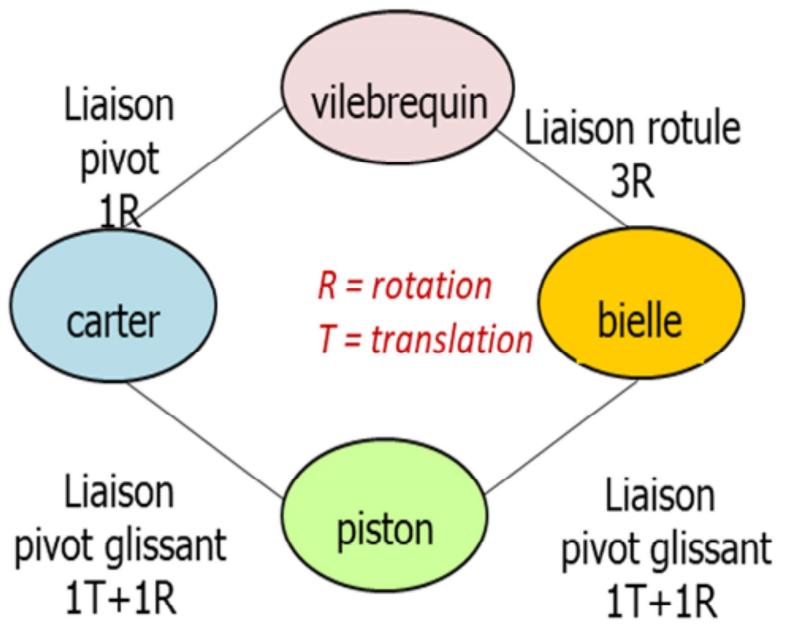
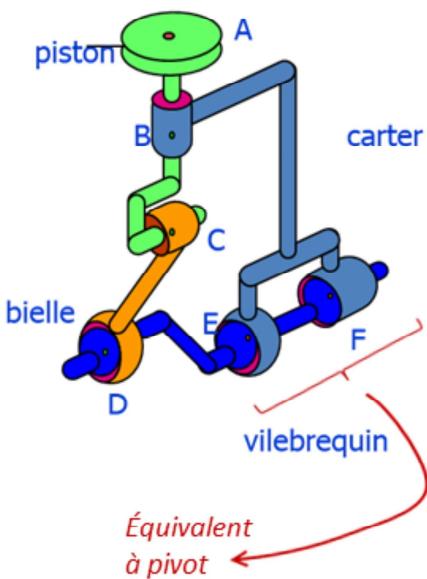
### ► Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



Graphe des liaisons associé au mécanisme.

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

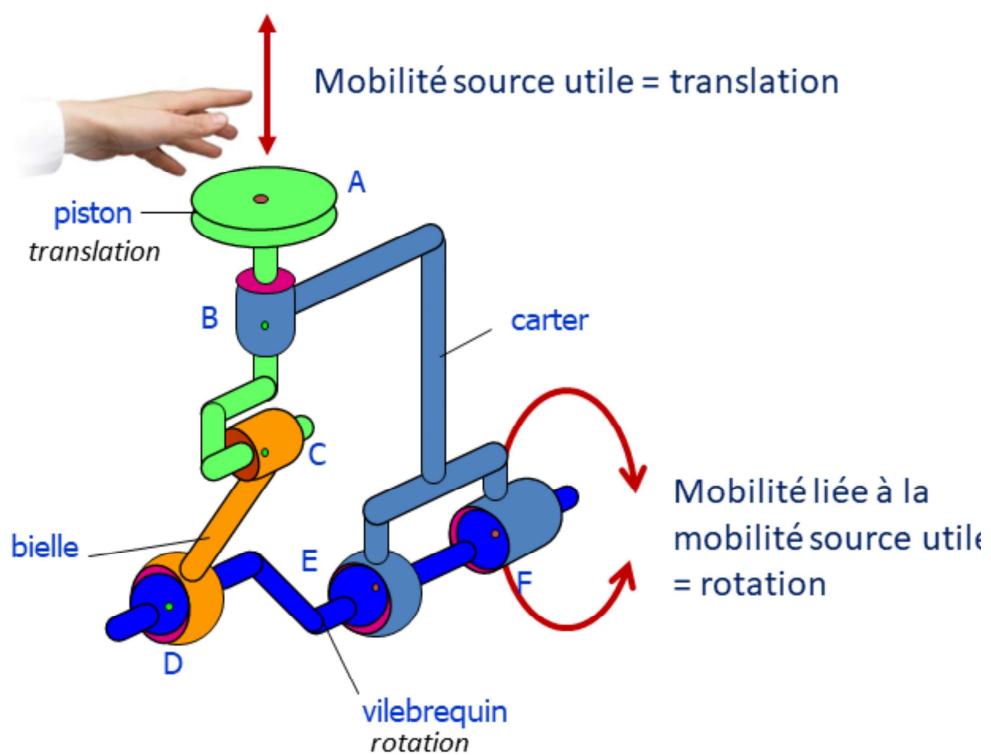
► Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



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.

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

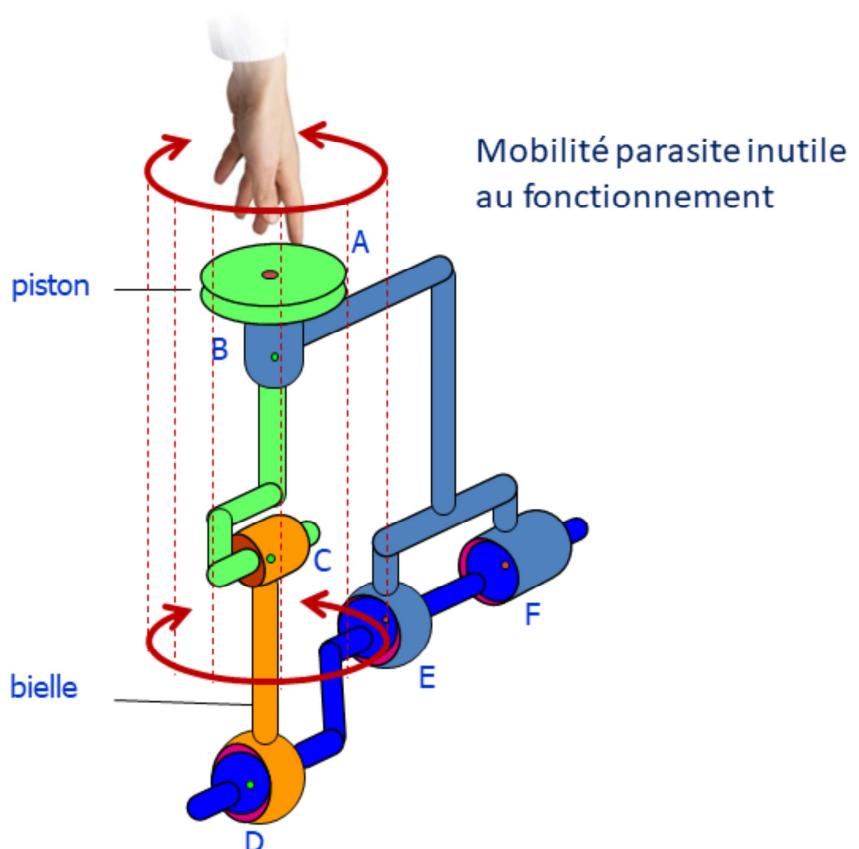
### ► Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



On observe (c'est plus facile à faire 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.

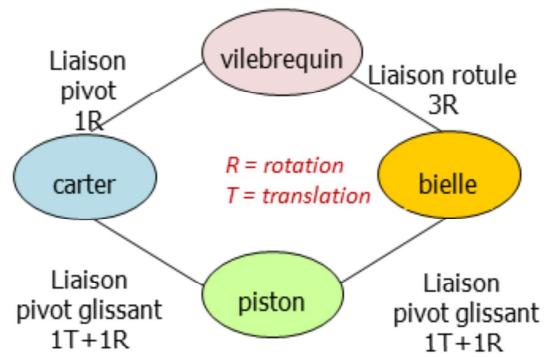
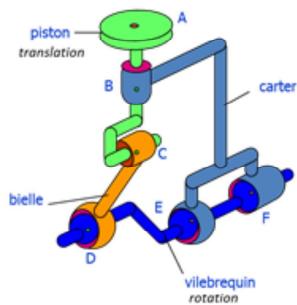
Ce mouvement, à priori **inutile**, est appelé **mobilité parasite**.

Il peut exister (généré par des vibrations par exemple) mais il peut aussi être nul sans nuire au bon fonctionnement.

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

# Mobilités

**Composition**  
 Eléments constitutifs  
**Mécanique**  
 ► **Mobilités**  
 Grippage  
**Lubrification**  
 Circuit & pompe  
**Application**



4 liaisons =  $6 \times 4$  paramètres = 16 degrés de liaison  
 et 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. Il reste 6 mouvements inconnus.

$$\begin{array}{l} \overrightarrow{V_1/2 + V_2/3 + V_3/4 + V_4/1 = V_1/1 = 0} \\ \overrightarrow{\omega_1/2 + \omega_2/3 + \omega_3/4 + \omega_4/1 = \omega_1/1 = 0} \end{array}$$

2 équations vectorielles  
 soit  $2 \times 3 = 6$  éq scalaires (projection)

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

6 inconnues, 6 équations →

**Mécanisme  
ISOSTATIQUE**

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** ⇔ **tous les mouvements possibles entre pièces doivent pouvoir être calculés à partir du mouvement source.**

Bilan :

4 liaisons =  $6 \times 4$  paramètres = 16 degrés de liaison et 8 degrés de liberté, ce sont ces 8 mouvements qui doivent être connus.

Parmi ces 8 degrés de liberté on a 1 mouvement source (translation piston) et 1 mouvement inutile (rotation propre piston) imposé par exemple à 0.

**Il reste 6 mouvements inconnus**

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

Dans ces conditions, 6 inconnues pour 6 équations ⇒ le mécanisme est bien isostatique, la conception peut être poursuivie...

# Mobilités

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

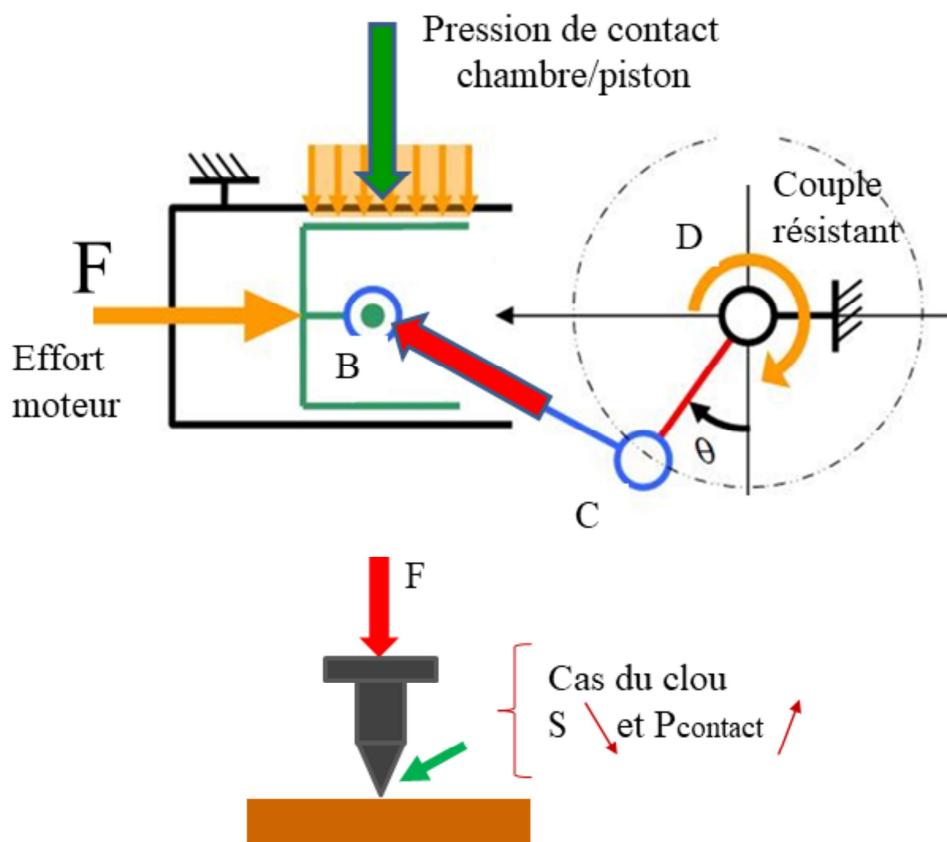
Mobilités

## Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application



L'effort  $F$  appliqué sur la liaison provoque un champ de pression sur la surface de contact entre le palier et l'arbre.

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, ce qui provoque la détérioration immédiate du palier

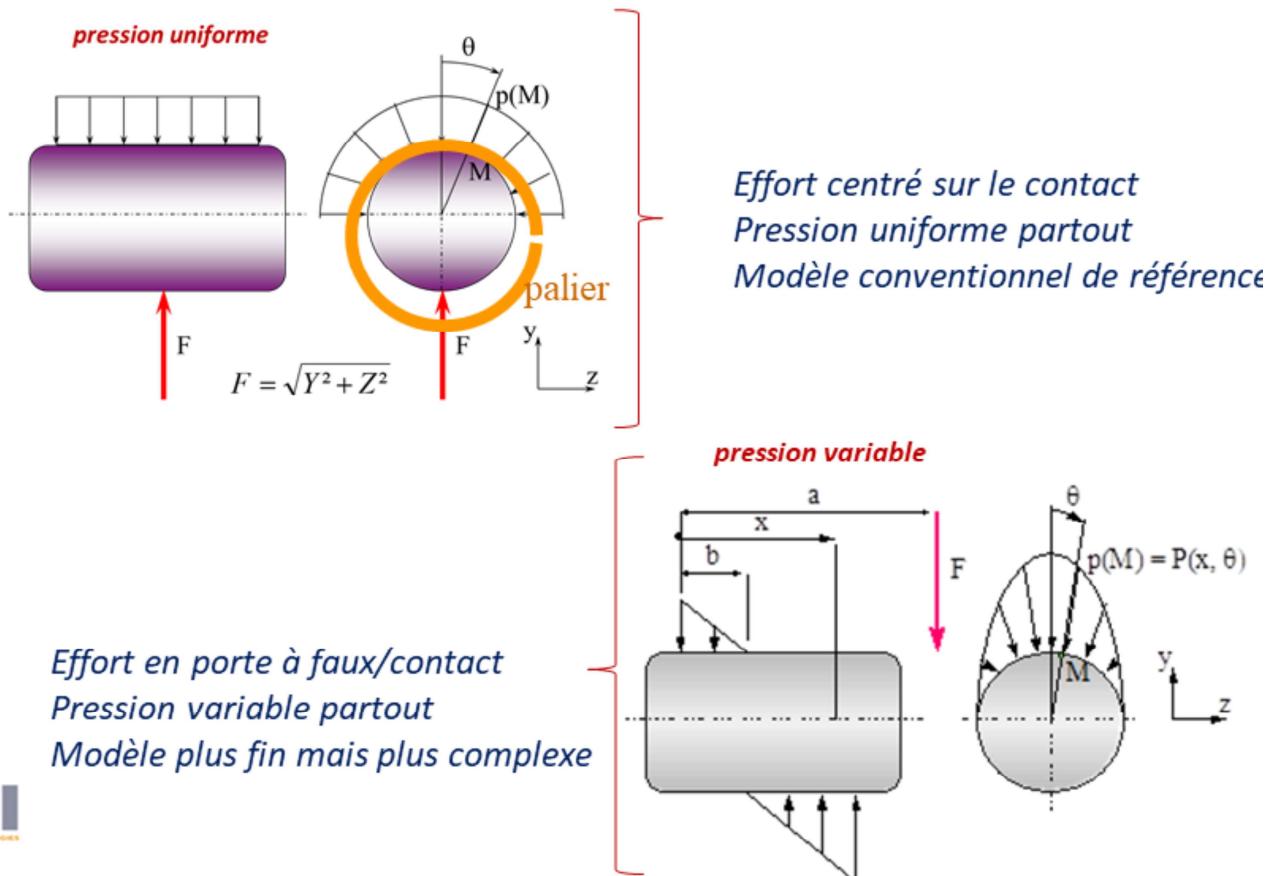
La valeur  $P_{max}$  est naturellement fonction de l'allure du champ de pression.

L'allure la plus simple (pression uniforme) est ici retenue.

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

# Mobilités

**Composition**  
 Eléments constitutifs  
**Mécanique**  
 Mobilités  
 Grippage  
**Lubrification**  
 Circuit & pompe  
**Application**



L'effort  $F$  appliqué sur la liaison provoque un champ de pression sur la surface de contact entre le palier et l'arbre.

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, ce qui provoque la détérioration immédiate du palier

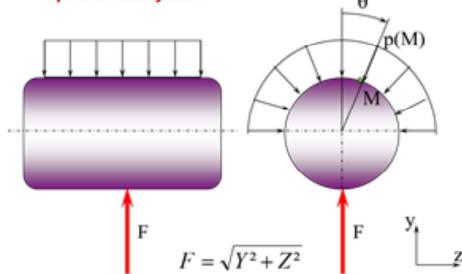
La valeur  $P_{max}$  est naturellement fonction de l'allure du champ de pression.

L'allure la plus simple (pression uniforme) est ici retenue, c'est la pression conventionnelle.

# Mobilités

- Composition
- Eléments constitutifs
- Mécanique
- Mobilités
- Grippage
- Lubrification
- Circuit & pompe
- Application

*pression uniforme*



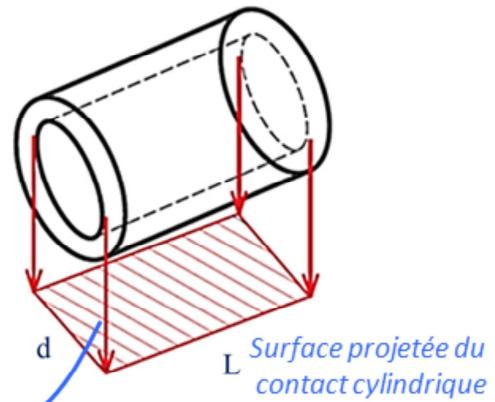
$$\vec{F} = \iint_S -p \cdot \vec{n} \, ds$$

avec  $\vec{n} = \sin\theta \cdot \vec{z} + \cos\theta \cdot \vec{y}$  et  $ds = R \, d\theta$

$$\Leftrightarrow \vec{F} = - \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p \cdot \sin\theta \cdot \vec{z} \, R \, d\theta - \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p \cdot \cos\theta \cdot \vec{y} \, R \, d\theta$$

$$\Leftrightarrow \vec{F} = - \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p \cdot \cos\theta \cdot \vec{y} \, R \, d\theta = +2 \cdot R \cdot L \cdot p \cdot \vec{y}$$

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



- *coussinet en bronze lubrifié*
- *coussinet autolubrifié en métal fritté*
- *coussinet en plastique phénolique lubrifié*
- *coussinet sans graissage en nylon*

$\Rightarrow P_{adm} \# 50 \text{ Mpa}$ ,  
 $\Rightarrow P_{adm} \# 25 \text{ Mpa}$ ,  
 $\Rightarrow P_{adm} \# 20 \text{ Mpa}$ ,  
 $\Rightarrow P_{adm} \# 6 \text{ Mpa}$ .

Quel que soit la forme du contact (cylindre, sphère...) la pression moyenne, développée par une force sur lui, est égale à l'effort divisé par la surface projetée du contact.

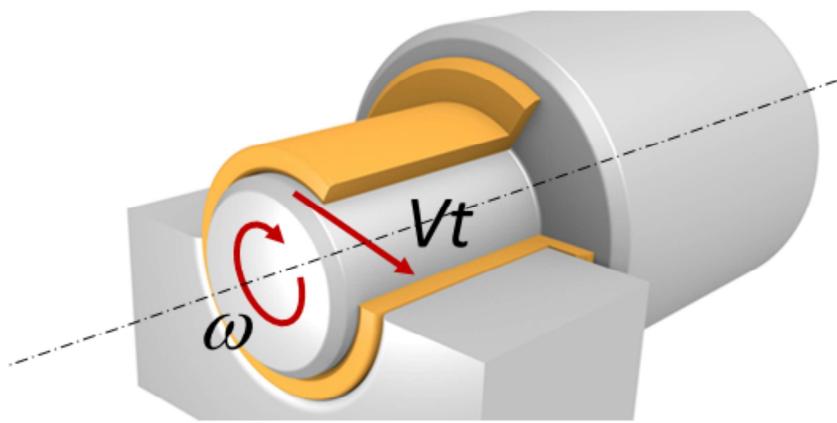
Padm est fournie par les constructeurs de paliers.

De façon plus générale, la pression obtenue dans le cas d'un champ uniforme est toujours égale à la valeur de l'effort divisée par la surface projetée du contact.

Pour une sphère (liaison rotule) de rayon r,  $p = F/\pi \cdot r^2 \dots$

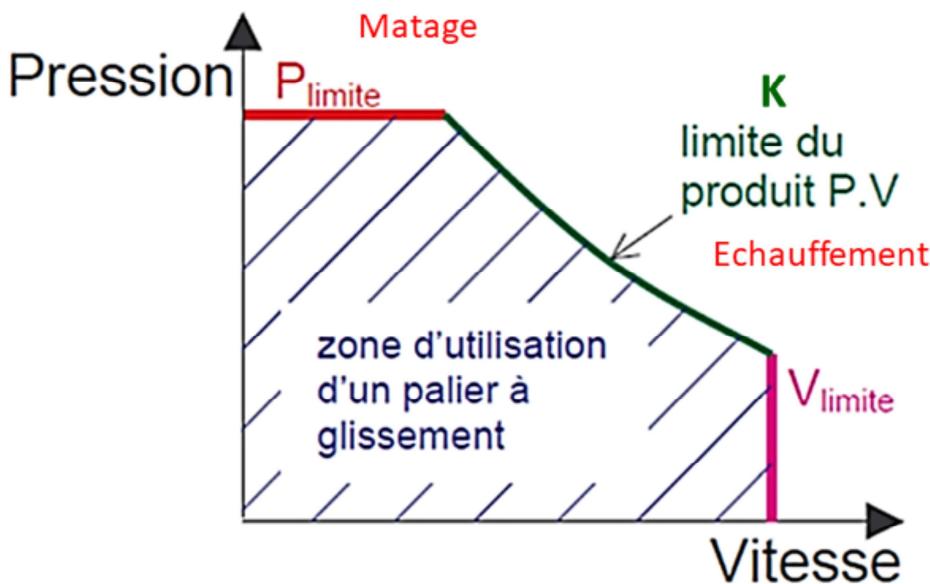
# Mobilités

- Composition
- Eléments constitutifs
- Mécanique
- Mobilités
- Grippage
- Lubrification
- Circuit & pompe
- Application



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

*Vitesse tangentielle*   *Vitesse de rotation*   *Rayon palier*



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

Le frottement existe toujours, les efforts tangentiels développent un effort ou un couple de frottement qui dissipent une puissance.

On montre que cette puissance dissipée 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**.

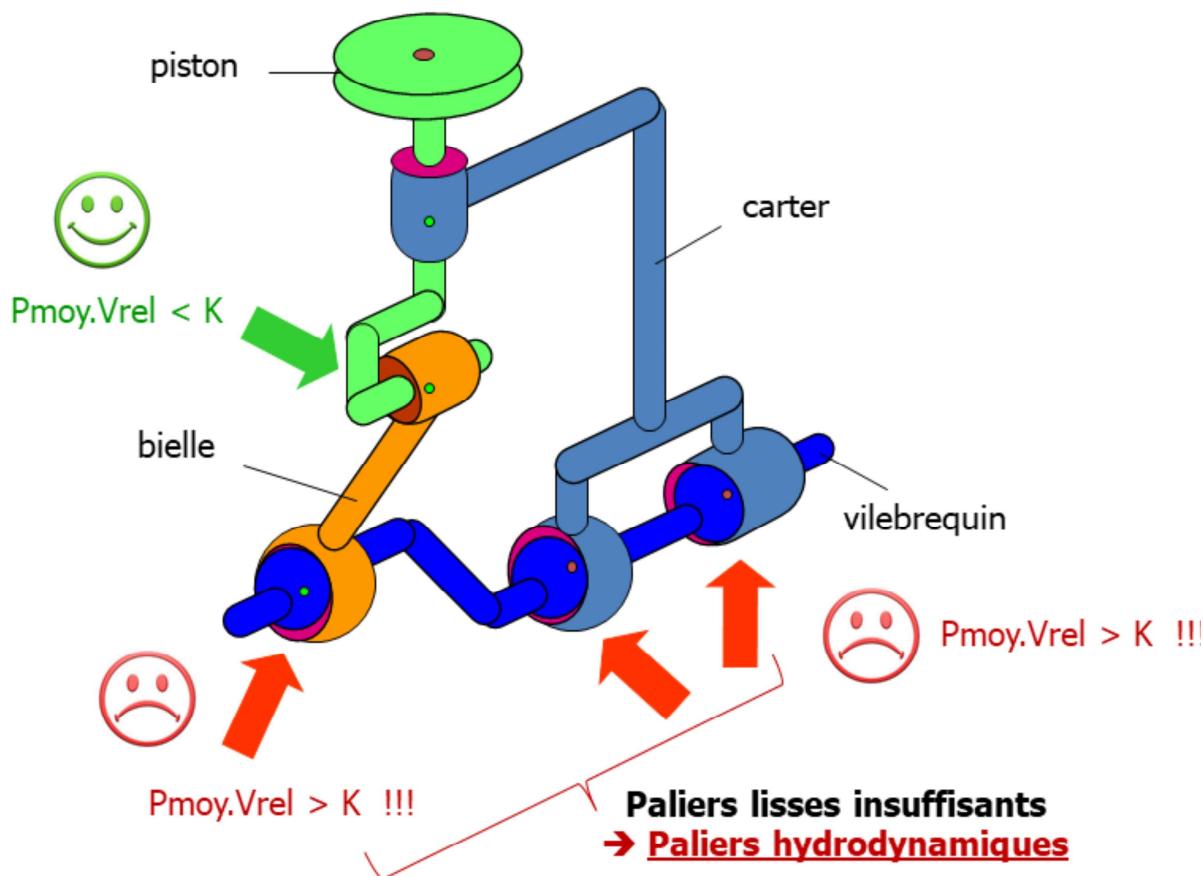
C'est la puissance maximale par unité de surface que la liaison peut dissiper avant d'être détruite par échauffement.

On en déduit la zone d'utilisation d'un palier...

$K$  est fourni par les constructeurs des paliers.

# Graissage impératif !

**Composition**  
 Eléments constitutifs  
**Mécanique**  
 Mobilités  
 **Grippage**  
**Lubrification**  
 Circuit & pompe  
**Application**



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 relative [W/mm<sup>2</sup>]) 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.

# Graissage impératif !

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Lubrification

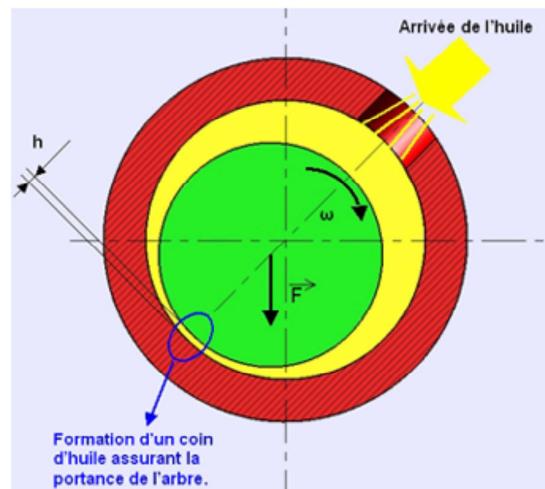
➤ Circuit & pompe

## Application



SI  $P \cdot V > K$

Palier hydrodynamique



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 !**

# Circuit de lubrification

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

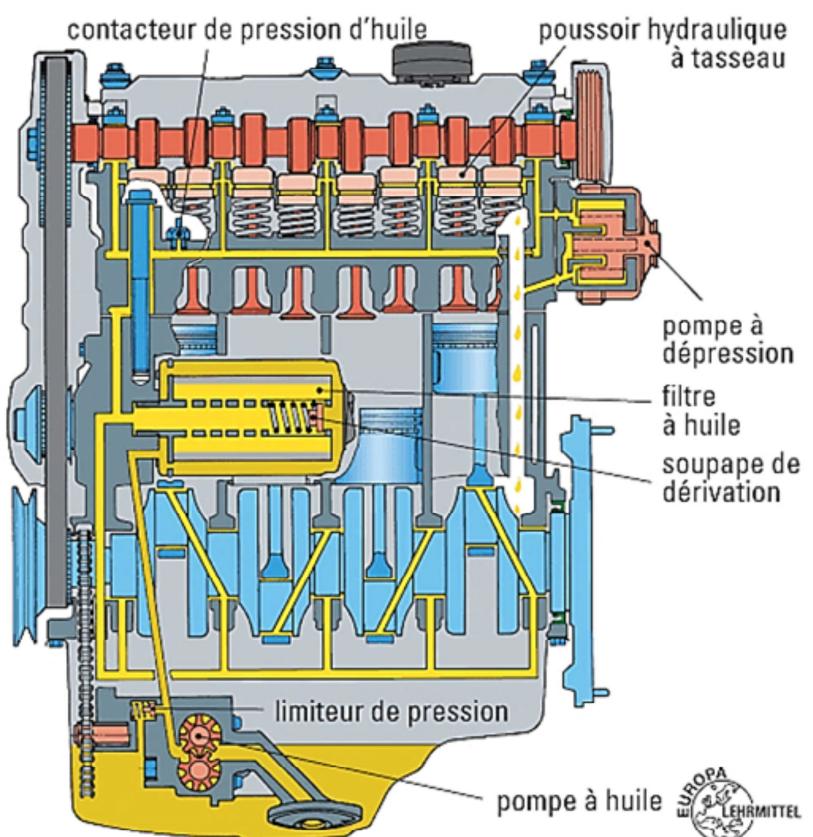
Grippage

## Lubrification

➤ Circuit & pompe

## Application

### Circuit de graissage



EUROPA  
LEHRMITTEL

Certaines liaisons (bielle-vilebrequin et carter-vilebrequin) nécessitent donc l'injection d'huile sous pression (palier hydrodynamique).

D'autres (piston-chemise et came-poussoir) 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.

# Circuit de lubrification

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

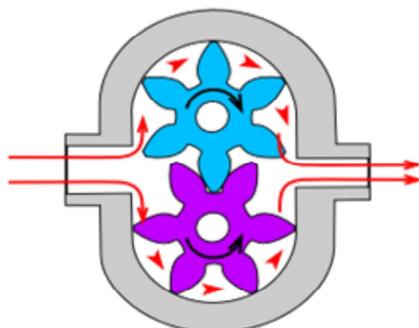
Mobilités

Grippage

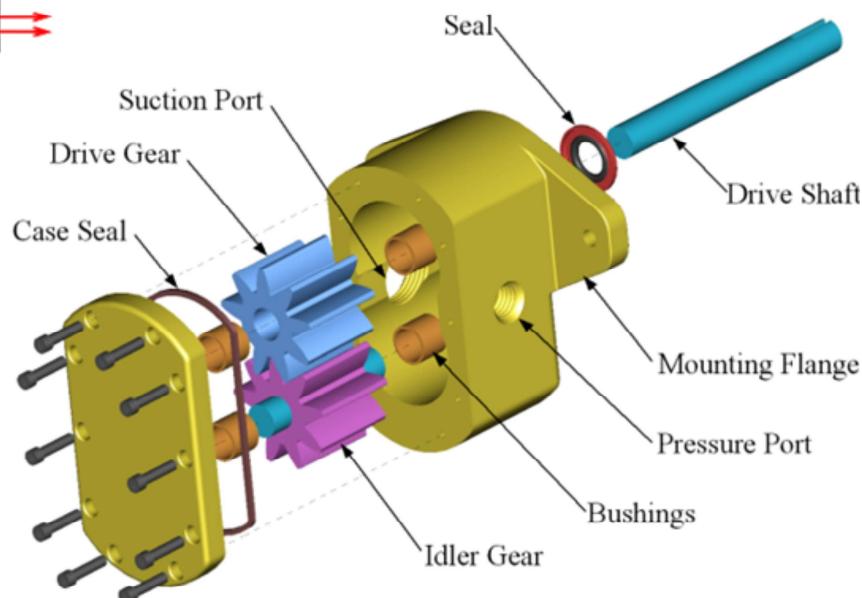
## Lubrification

### Circuit & pompe

## Application



Pompe  
à huile



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 une partie de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre moteur...

# Application 3

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

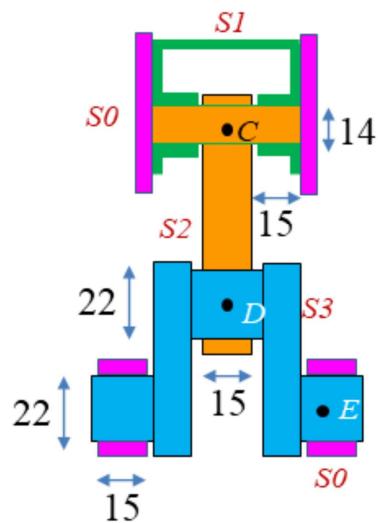
Grippage

## Lubrification

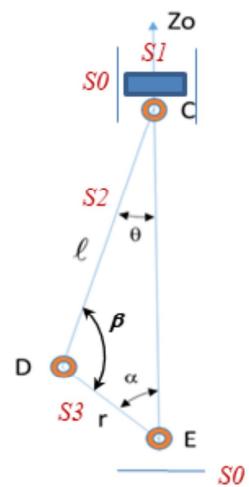
Circuit & pompe

## Application

On étudie le système bielle manivelle d'un moteur à combustion interne 4T de tondeuse à gazon.



3	Vilebrequin	1	Fonte		
2	Bielle	1	Fonte		
1	Piston	1	Aluminium		
O	Carter	1	Fonte		
Rep.	Désignation	Nb. Matière			
MOTEUR A EXPLOSION					



Course mesurée  $2r = 47$  mm

$l = 89$  mm

D piston = 63 mm

Pexplosion = 2,5 MPa

# Application 3

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application

### Travail demandé :

❶ La loi de composition des vitesses de rotations impose :  $\overrightarrow{\omega(\frac{S_0}{S_1})} + \overrightarrow{\omega(\frac{S_1}{S_2})} + \overrightarrow{\omega(\frac{S_2}{S_3})} + \overrightarrow{\omega(\frac{S_3}{S_0})} = \vec{0}$   
En déduire une relation entre  $\alpha'$  et  $\beta'$  et  $\theta'$ .

❷ Montrer d'autre part que :  $r \cdot \alpha' \cdot \cos \alpha = l \cdot \theta' \cdot \cos \theta$

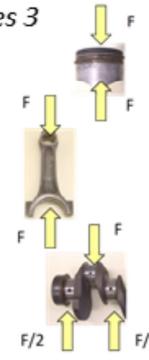
❸ Evaluer au PMH les vitesses des rotations relatives  $\beta'$  et  $\theta'$  en fonction des distances sachant que dans le cas le plus défavorable le vilebrequin tourne à  $\alpha' = 314 \text{ rad/s}$  (environ 3000 tr/mn).

❹ Sur chaque surface de contact cylindrique, le mouvement relatif entre les deux pièces en contact est circulaire. Déterminer alors les vitesses tangentielles relatives au niveau des 3 liaisons « piston-bielle », « bielle-vilebrequin » et « vilebrequin-carter ».

❺ On suppose que la pression  $P$  sur le piston au moment de l'explosion (au PMH donc) est égale à 3 Mpa. L'effort  $F$  généré se répercute comme sur la figure ci-contre. Déterminer  $F$ .

❻ Déterminer les trois pressions moyennes de contact,  $P_c$ .

❼ Toutes les liaisons sont lisses (absence de palier hydrodynamique). Les solutions technologiques retenues lors de la conception de ces 3 liaisons sont-elles confirmées par ces calculs à la pression admissible et au grippage si  $K = 80 \text{ W/mm}^2$  ?



# Application 3

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Lubrification

Circuit & pompe

## Application

### Eléments de solution :

❶ La loi de composition des vitesses en projection

(sens sortant + et sens rentrant -) :

$$\omega_0 1 + \omega_1 2 + \omega_2 3 + \omega_3 0 = 0 \rightarrow 0 + \theta' - \beta' + \alpha' = 0$$

❷ D'autre part que :  $r \cdot \sin \alpha = l \cdot \sin \theta$  après dérivation  $\rightarrow r \cdot \alpha' \cdot \cos \alpha = l \cdot \theta' \cdot \cos \theta$

❸ Au PMH  $\alpha = \theta = 0$  et  $\beta = \pi$ . et  $\alpha' = 314 \text{ rad/s}$

$$\rightarrow \theta' = \alpha' \cdot r/l = 314 \cdot 23,5/89 = 82 \text{ rad/s} \text{ et } \beta' = \alpha' \cdot (1+r/l) = 397 \text{ rad/s}$$

❹ De manière générale  $V_{ij} = \omega_{ij} * r_{ij}$

$$V_{12} = \theta' \cdot 0,014/2 = 0,58 \text{ m/s} \quad V_{23} = \beta' \cdot 0,022/2 = 4,36 \text{ m/s} \quad V_{30} = \alpha' \cdot 0,022/2 = 3,45 \text{ m/s}$$

$$❺ F = P \cdot \pi \cdot D^2 / 4 = 2,5 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 0,063^2 / 4 = 7792 \text{ N}$$

❻ De manière générale  $P_{cij} = F_{ij} / (L_{ij} * d_{ij})$

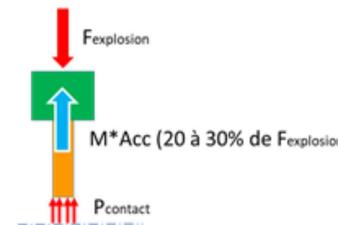
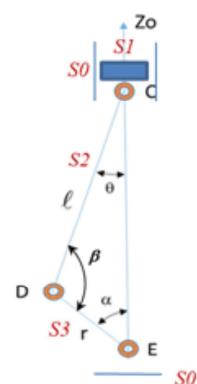
$$P_{c12} = 7792 / [14 \cdot 2 \cdot 15] \# 18 \text{ MPa}, \quad P_{c23} = 7792 / [22 \cdot 15] \# 23,5 \text{ MPa},$$

$$P_{c30} = 7792 / [2 \cdot 22 \cdot 15] \# 12 \text{ MPa}$$

❼ On doit vérifier  $P_{cij} * V_{ij} < K$  ( $80 \text{ W/mm}^2$  ici)

$$P_{c12} * V_{12} = 11 \text{ W/mm}^2, \quad P_{c23} * V_{23} = 102 \text{ W/mm}^2, \quad P_{c30} * V_{30} = 41 \text{ W/mm}^2.$$

Valeur plus faible de 20 à 30% si on tient compte des efforts d'inertie opposés aux accélérations, soit autour de  $75 \text{ W/mm}^2$  (Si moteur automobile, palier hydrodynamique obligatoire !)





4 place Tarradin - BP 71427  
25211 Montbéliard Cedex

Tél. : +33 (0)3 81 99 46 62  
Fax : +33 (0)3 81 99 46 61  
ufr-stgi@univ-fcomte.fr

<http://stgi.univ-fcomte.fr>