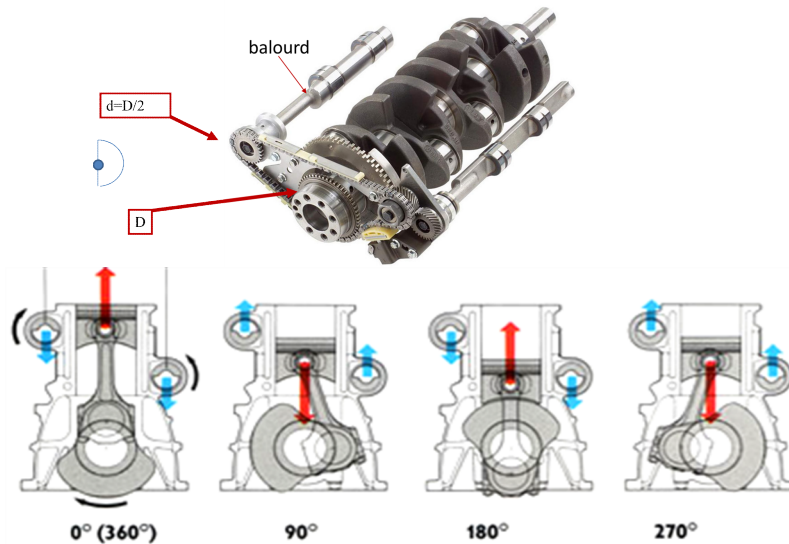


Ainsi, si on utilise deux arbres **contrarotatifs équipés de balourds**, qui tournent **2 fois plus vite** que le vilebrequin, on va pouvoir générer des forces opposées à l'effort d'inertie observé diapositive précédente.

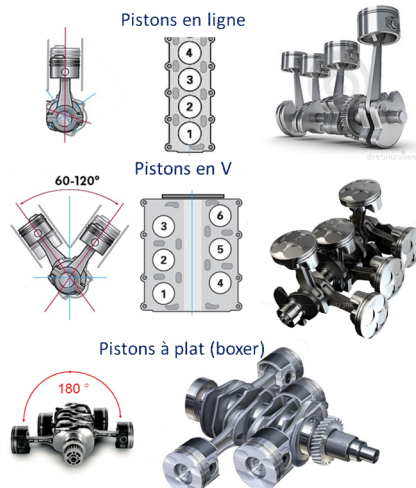


Architectures les plus courantes

L'architecture la plus courante consiste donc à utiliser un moteur 4 cylindres en ligne. Les cycles se succèdent avec un décalage de 180°, ce qui procure un temps moteur chaque ½ tour et assure une bonne régularité de la courbe de couple.

Le moteur en V est plus compact et bien plus rigide en torsion. Il développe moins de vibrations et sa régularité cyclique est excellente.

Le moteur à plat, « flat four, flat six, flat twelve, ou encore boxer » possède l'avantage d'abaisser le centre de gravité du véhicule, améliorant ainsi sa tenue de route...



Et le moteur à 3 cylindres ?

Le downsizing est une réponse directe aux normes d'émissions européennes. En réduisant la cylindrée et en compensant par un turbo, les constructeurs obtiennent des moteurs conformes aux réglementations tout en maintenant des performances acceptables.

L'autre facteur clé : l'hybridation. Le 3 cylindres est devenu le partenaire privilégié des architectures hybrides légères et full hybrid. Couplé à un moteur électrique qui compense ses limites à basse vitesse, il offre un excellent bilan énergétique.

Les limites du moteur 3 cylindres : des vibrations plus perceptibles

Un nombre impair de cylindres crée un déséquilibre mécanique naturel. Les constructeurs le compensent par des contrepoids et des arbres d'équilibrage, mais à bas régime, au ralenti, au démarrage, des vibrations restent parfois perceptibles. C'est le principal reproche fait aux 3 cylindres.

Technologie des Machines à Fluides

Dossier 2 - 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).

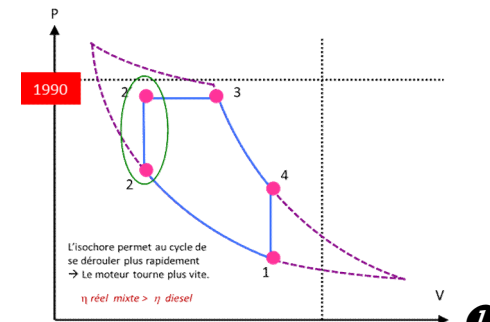
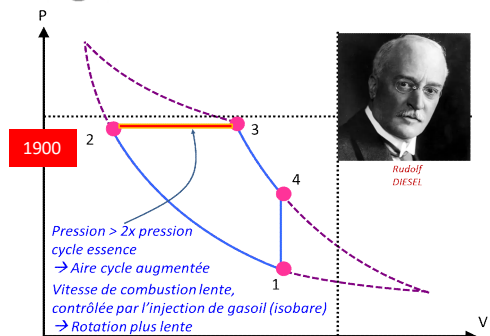
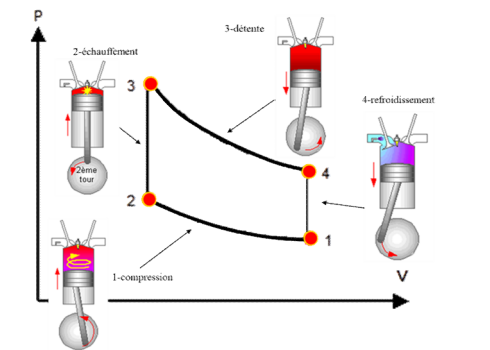
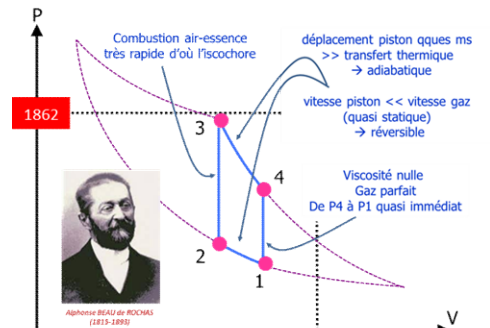
La température T2 est alors plus grande et afin d'éviter une auto-inflammation du mélange on réalise une compression séparée du carburant. Lors de l'injection il y a inflammation immédiate, donc ce système ne comporte pas de bougies d'allumage.

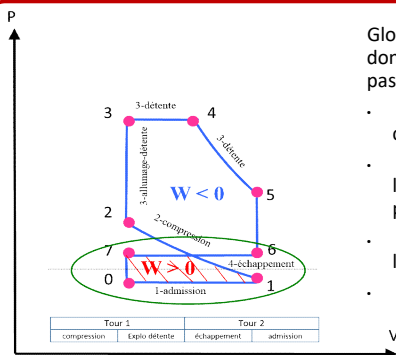
Le temps d'injection est réglé de façon à ce que la transformation 2-3 soit isobare...ceci n'est pas sans conséquence sur la limitation en régime des moteurs diesels qui tournent moins vite que « les essences ».

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.**

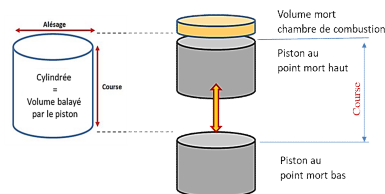




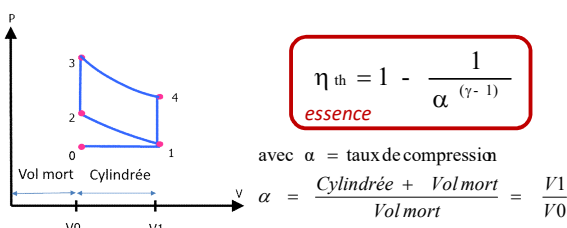
Globalement la masse des gaz varie (admission, échappement), le cycle est donc ouvert et les transformations successives idéales et réversibles ne sont pas réalisables. En effet :

- 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



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

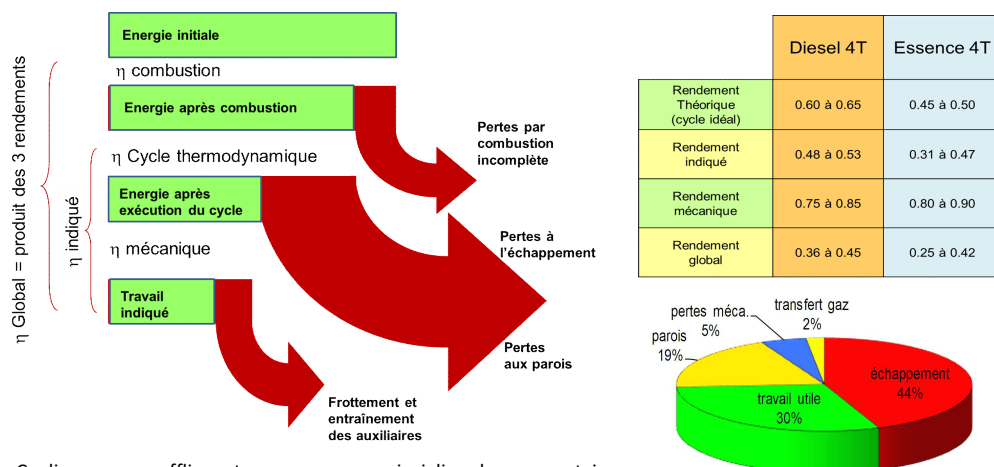


On remarque que le rendement essence est d'autant plus élevé que le taux de compression α est élevé.

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.

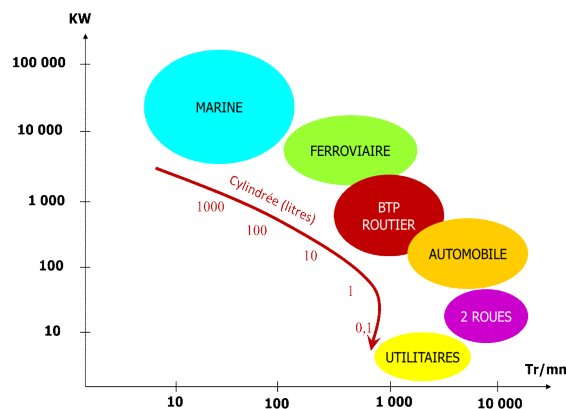
Pour avoir une masse d'air plus importante dans le cylindre, on peut diminuer sa température, augmenter sa pression, augmenter son volume.

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.

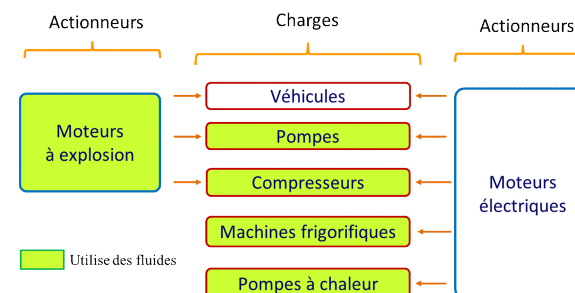
Ce constat est généralisable à tous les systèmes mécaniques.

Quelques éléments de contexte

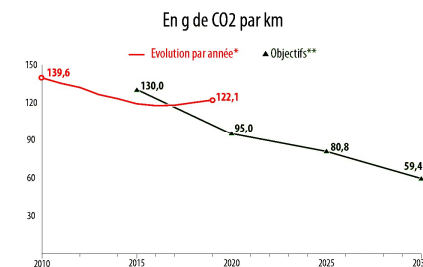
Concernant l'automobile, globalement depuis 1994 les émissions de CO2 n'augmentent plus au même rythme que la circulation, tant l'efficacité énergétique des moteurs a été améliorée.

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

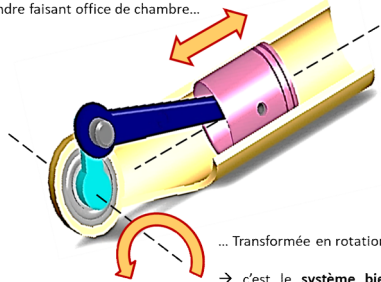


* Estimé pour 2010, 2011 et 2012
 ** Objectifs indicatifs calculés par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) conformément au règlement (UE) 2019/631.
 Sources : Eurostat (sdg_12_30); Agence européenne pour l'environnement (AEE), 2021

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...



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

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

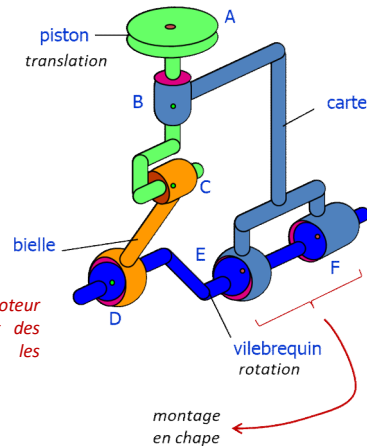
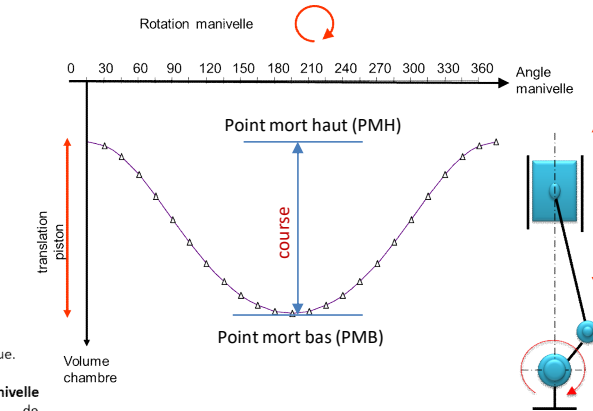
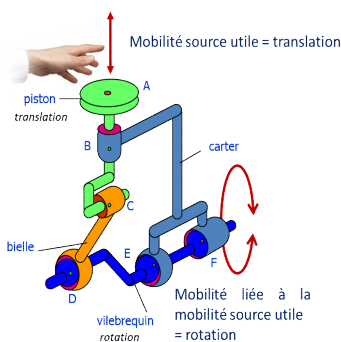
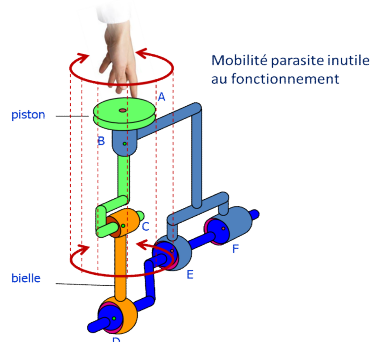
Bielle/vilebrequin → L/D < 1.5 liaison courte

Vilebrequin/carter → L/D > 1.5 liaison longue

jeu → 0 (dilatation)

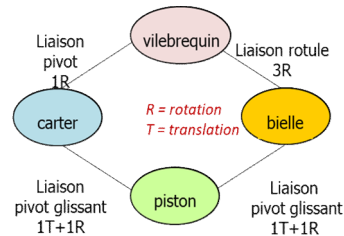
Piston/carter → liaison longue

Loi de mobilités



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

Graphe 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.

Ainsi on compte :

4 liaisons → 16 degrés de liaison et 8 degrés de liberté

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

$$6.(N-1) - SLI = M - v$$

$$\Leftrightarrow 6.(4-1) - 16 = (1+1) - v$$

$$\Leftrightarrow v = 0$$

L'architecture proposée est **ISOSTATIQUE**.

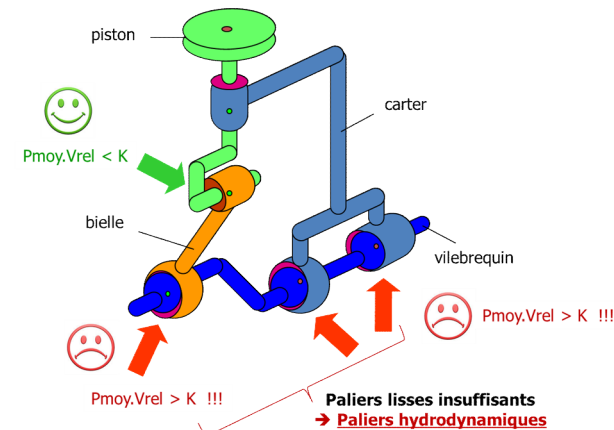
Pression de MATAGE dans les liaisons

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.

On vérifie donc qu'en tout point des surfaces en contact la pression de contact n'atteint pas la pression de matage.

Cet objectif est facilement atteint dans les architectures classiques des moteurs.

Surchauffe et GRIPPAGE



Les liaisons qui impliquent le vilebrequin supportent des efforts importants conjugués à des mouvements relatifs conséquents → la puissance dissipée par unité de surface (pression de contact x vitesse tangentielle [W/mm²]) est trop forte pour autoriser un contact direct entre les pièces concernées.

L'échauffement provoquerait le grippage de la liaison.

Le risque de grippage est très élevé au niveau :

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

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.

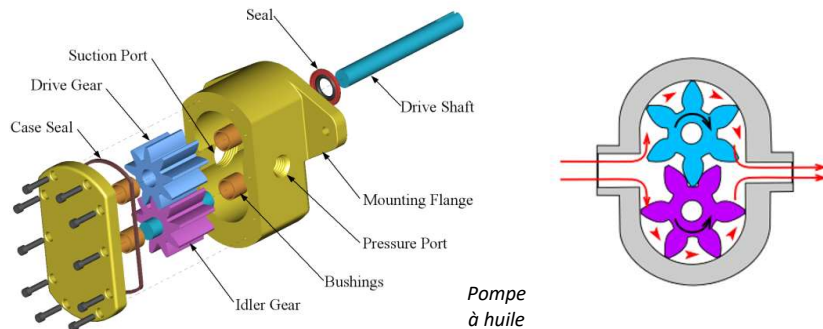
La pompe à huile est typiquement une pompe à engrenage, apte à développer une pression maximale en sortie de 4 à 6 bars et un débit de plusieurs litres par minute.

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

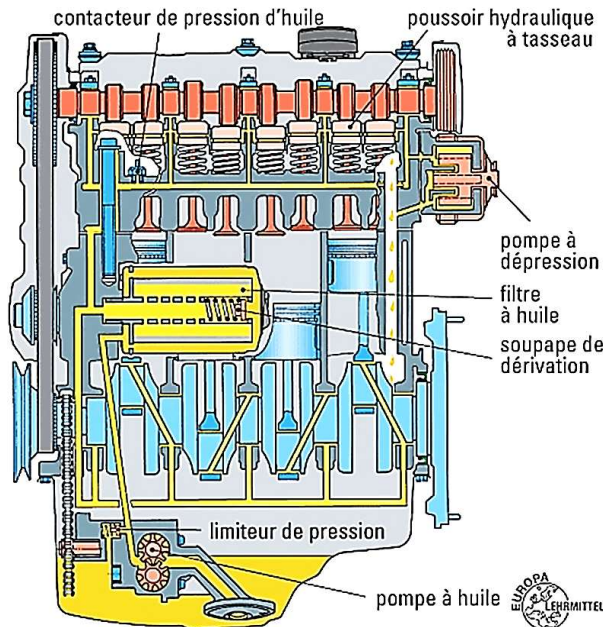
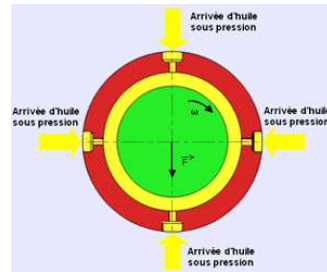
L'arbre de commande de cette pompe est entraîné par le vilebrequin.

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...



Pompe à huile



Equilibrage des efforts d'inertie

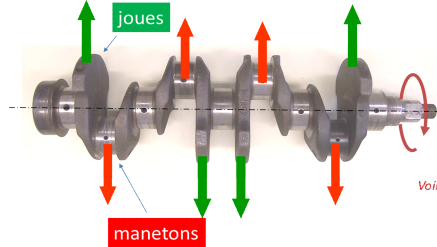
La force d'inertie s'oppose à la quantité d'accélération : $F_i = -m \cdot \vec{a}$.

Les forces d'inertie dans un moteur sont **considérables** vu les valeurs des accélérations imposées.

Le rôle de l'équilibrage est de compenser au mieux ces forces génératrices de vibrations et destructrices.

On distingue principalement 3 types de forces d'inertie (rectilignes, oscillantes, tournantes).

On traitera ici des forces d'inertie rectilignes ou tournantes.



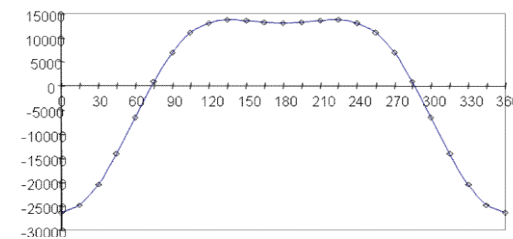
Les forces d'inertie rectilignes sont composées de deux familles :

- les forces qui changent de sens une fois dans un tour (premier ordre)
- les forces qui changent de sens 2 fois dans un tour (second ordre)

Chaque famille fait l'objet d'une stratégie et d'un traitement particulier.

Pour le premier ordre, les moments développés par les forces d'inertie sont annulés en multipliant les pistons.

Pour le second ordre, comme il n'est pas possible d'augmenter beaucoup la longueur de la bielle L, on utilise un équilibrage de type Lanchester (ingénieur anglais).



Le premier graphe montre l'accélération typique d'un piston.

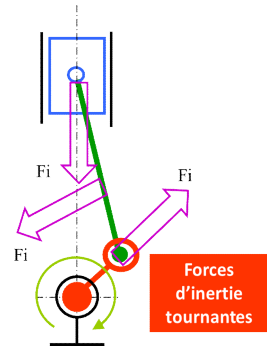
Le second graphe montre la somme de 4 accélérations de second ordre déphasées comme sur un moteur à 4 pistons.

On observe alors qu'une force d'inertie globalement sinusoïdale va naître et qu'elle va changer de signe 2x chaque tour.

Sa fréquence est donc le **double** de la fréquence de rotation du moteur.

Forces d'inertie rectilignes

Forces d'inertie oscillantes



Les forces d'inertie tournantes sont « simplement » compensées par des masselottes (balourds) encore appelées joues disposées à l'opposée des manetons et de masse.

$$Acc_{piston / carter} \rightarrow r \cdot \omega^2 \left[\cos(\omega t) + \frac{r}{L} \cdot \cos(2\omega t) \right]$$

1 cycle par tour
1 chgt de signe par tour
↳ **1er ordre**

2 cycles par tour
2 chgts de signe par tour
↳ **2ème ordre**

Moteur poly-cylindriques

Augmenter L... (!)

Equilibrage de type Lanchester

