

# MOTEURS THERMIQUES – partie 2b

## De la conception à la réalisation...



Dans cette partie 2b on poursuit l'étude de la technologie *classiquement* utilisée pour fabriquer un moteur thermique à arbre tournant et pistons alternatifs.

# Equilibrage

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## ► Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

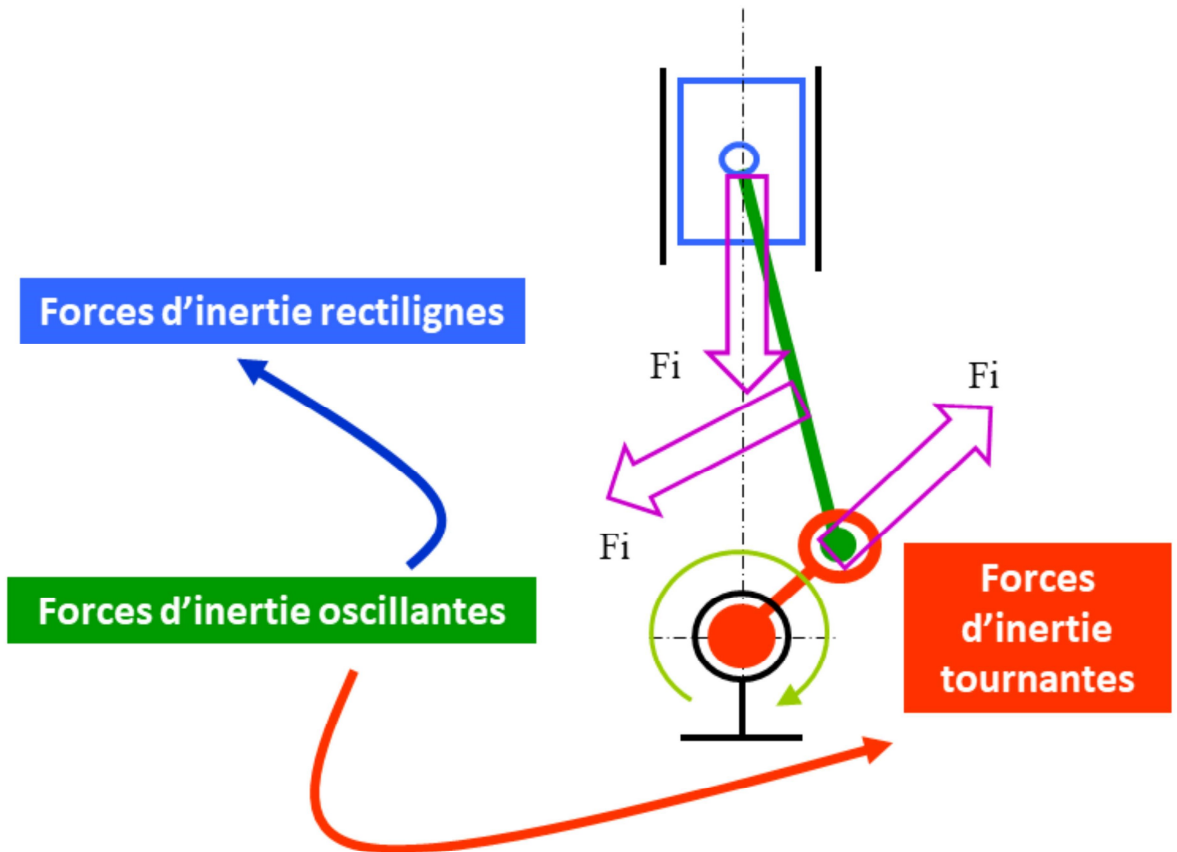
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



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

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.

# Equilibrage des forces d'inertie tournantes

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

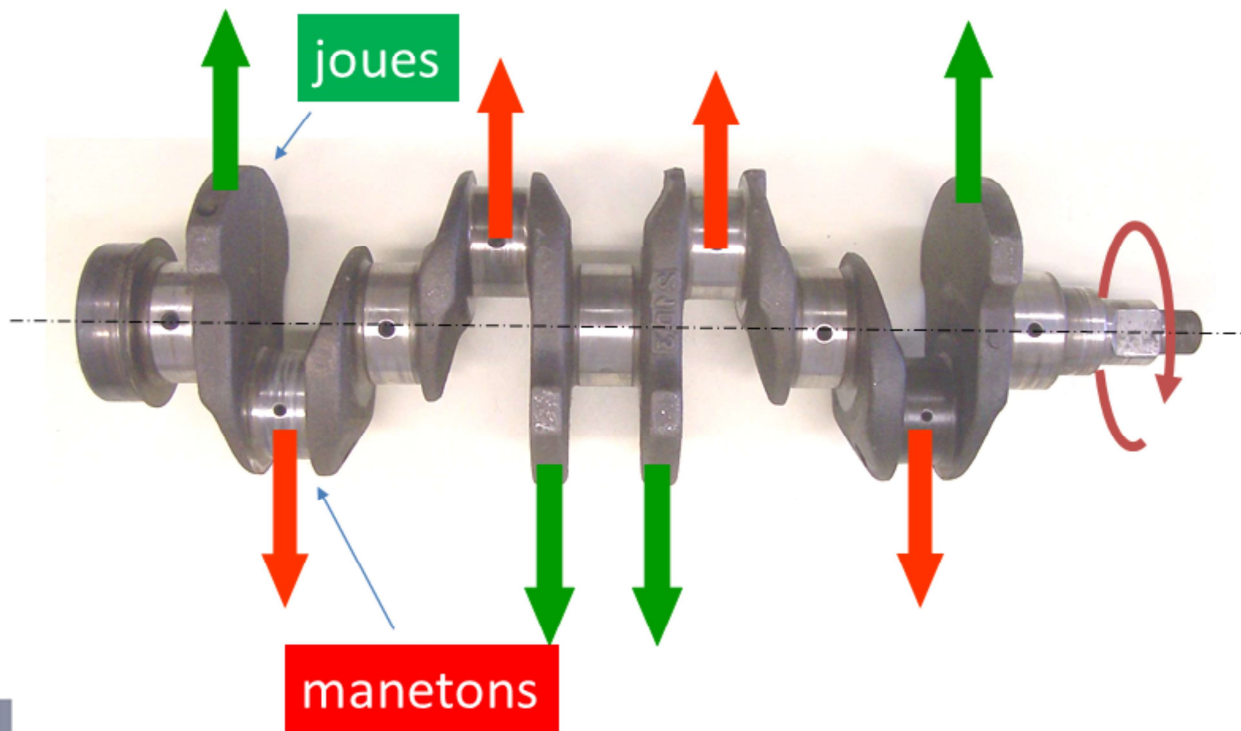
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



Les forces d'inertie tournantes sont « simplement » compensées par des masselottes (balourds) encore appelées joes.

# Equilibrage des forces d'inertie rectilignes

## Composition

Eléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage

Voir EX2 sur [www.mecanologie.fr/M1](http://www.mecanologie.fr/M1)

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

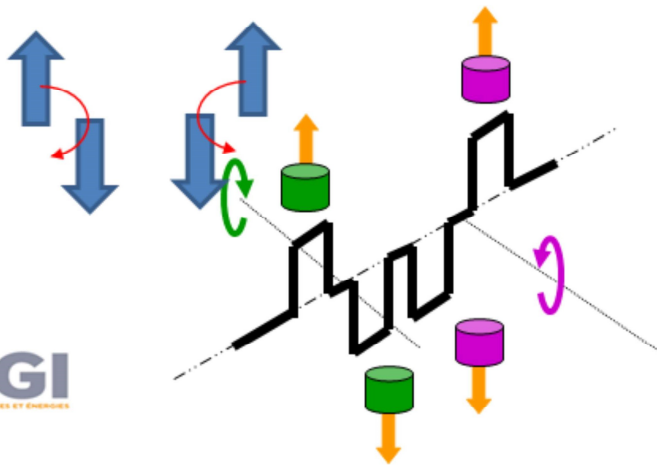
1 cycle par tour  
1 chgt de signe par tour  
↳ **1er ordre**

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

➔ Moteur poly-cylindriques

➔ Augmenter L... (!)

➔ Equilibrage de type Lanchester



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).



# Equilibrage Lanchester

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

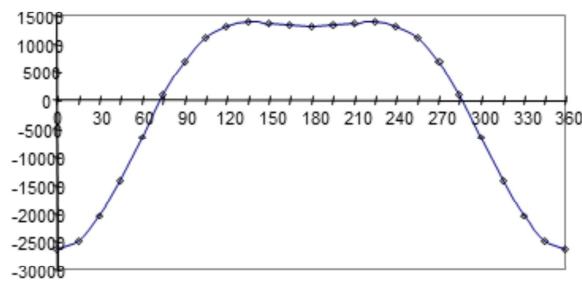
## Injection

Essence

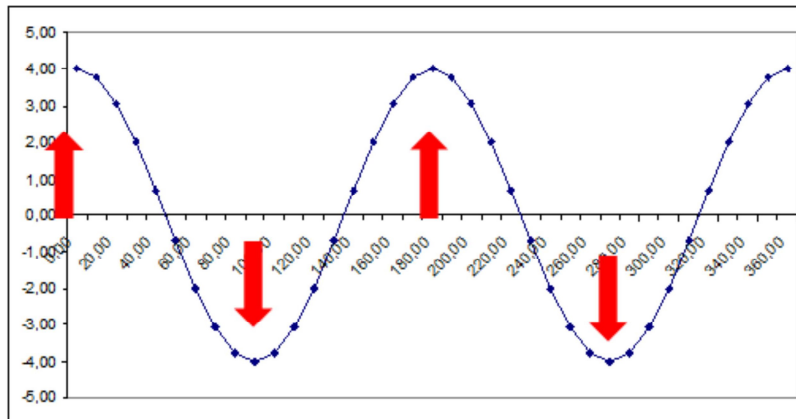
Diesel

## Allumage

Allumage



Accélération totale  
(premier et deuxième ordre)  
sur un piston



Somme des  
accélérations  
du second ordre  
Pour un ensemble  
de 4 pistons

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.

# Equilibrage Lanchester

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

## Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

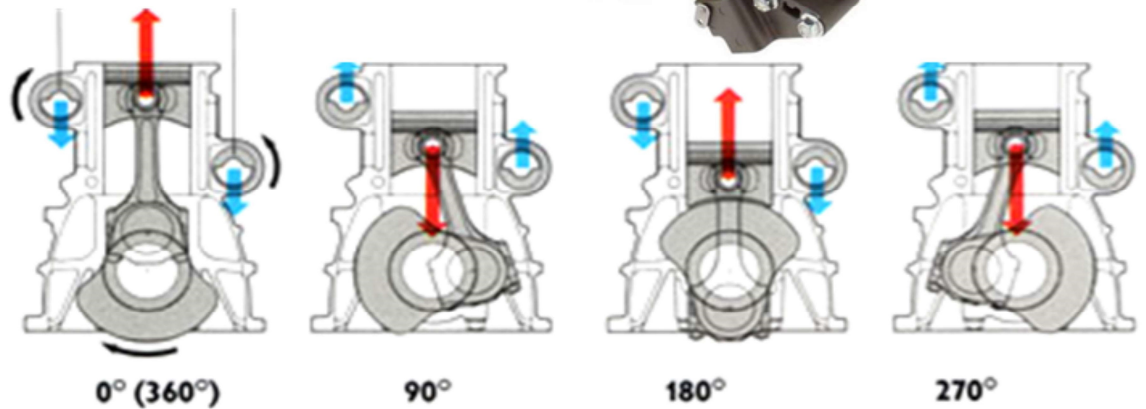
Allumage



$$d = D/2$$

D

balourd



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.

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

## Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

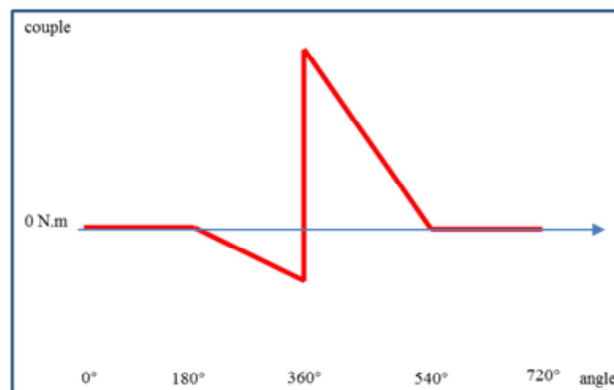
## Injection

Essence

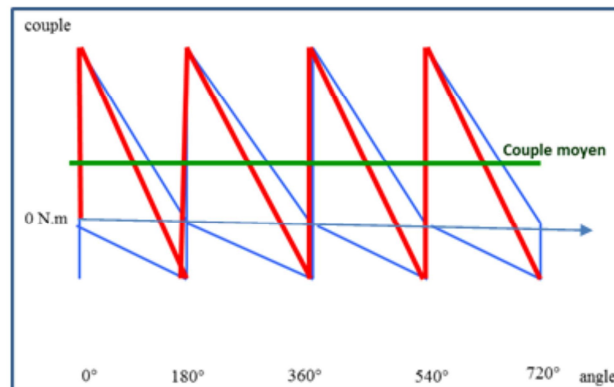
Diesel

## Allumage

Allumage



Allure du couple  
moteur à un piston



Allure du couple  
moteur à 4 pistons

La première figure représente l'allure du couple moteur pour un moteur monocylindrique. Durant les phases d'admission et d'échappement le couple est très faible.

Il est même **négatif** durant la compression (on donne de l'énergie au moteur) et fortement positif durant la phase d'explosion détente...

On multiplie le nombre de pistons.

La seconde figure superpose 4 courbes de la figure 1 en les décalant de 180° sur 2 tours (moteur à 4 pistons).

Le couple moyen est alors très grossièrement constant...

Plus le nombre de pistons augmente, plus ce couple tend à être constant.

# Architecture

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

## Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

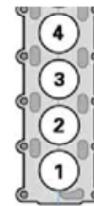
Essence

Diesel

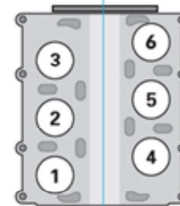
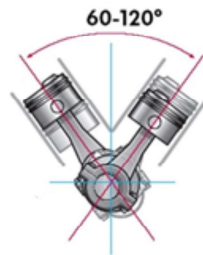
## Allumage

Allumage

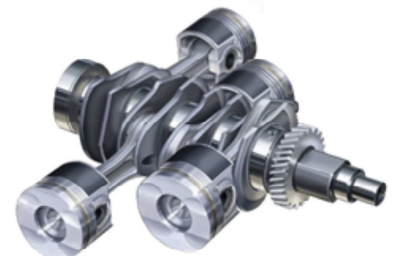
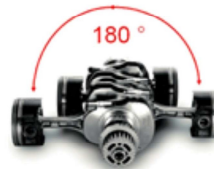
Pistons en ligne



Pistons en V



Pistons à plat (boxer)



L'architecture la plus courante, et de loin, consiste à utiliser un moteur 4 cylindres en ligne. Les cycles se succèdent avec un décalage de  $180^\circ$ , ce qui procure un temps moteur chaque  $\frac{1}{2}$  tour et assure une bonne régularité de la courbe de couple.

Le moteur en V, est plus compact, il est presque deux fois plus court qu'un moteur en ligne ayant le même nombre de cylindres. Sa structure est également bien plus rigide en torsion. Il développe moins de vibrations et sa régularité cyclique est parfaite pour un V6 ouvert à  $60^\circ$  ou  $120^\circ$  ( $360/6 = 60^\circ$ ), ou un V8 à  $90^\circ$  (2 V4 accolés).

Il peut exister des V6 à  $90^\circ$  (le moteur PRV Peugeot Renault Volvo est très connu pour cette particularité car il devait à l'origine être un V8...), qui compensent les soucis de régularité de couple à bas régime par l'utilisation de vilebrequin à manetons décalés de  $30^\circ$ .

Le moteur à plat, « flat four, flat six, flat twelve, ou encore boxer » (Porsche, et par le passé VW, Alfa Romeo, Ferrari et Citroën) possède l'avantage d'abaisser le centre de gravité du véhicule, améliorant ainsi sa tenue de route...

# Architecture

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

## Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

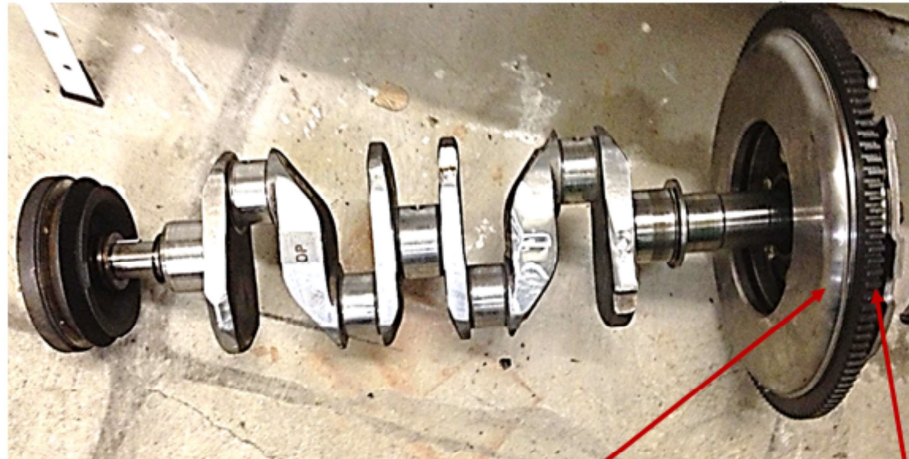
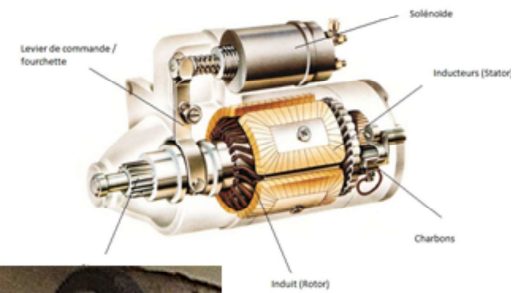
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



*Volant moteur*

*Denture*

On augmente la régularité du couple moteur en utilisant un volant d'inertie appelé **volant moteur**. Il est placé en bout de vilebrequin.

Il comporte aussi des dents à sa périphérie, elles permettent au pignon du démarreur électrique de lancer le moteur au départ.



# Obtention des bruts

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

## Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage

## FORGEAGE

## MOULAGE

Vilebrequin

Bielles

Piston

Culasse

Carter

Acier forgé

Alliage d'aluminium

Alliage d'alu  
( ou fonte )



*Puis usinage et traitements thermiques éventuels...*

On appelle « brut », la pièce obtenue après forgeage ou moulage.

C'est ce brut qui est ensuite usiné sur machine (tour, fraiseuse, rectifieuse...) pour obtenir la pièce finale qui va être utilisée lors de l'assemblage du moteur.

# La bielle et le vilebrequin

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

## ► Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

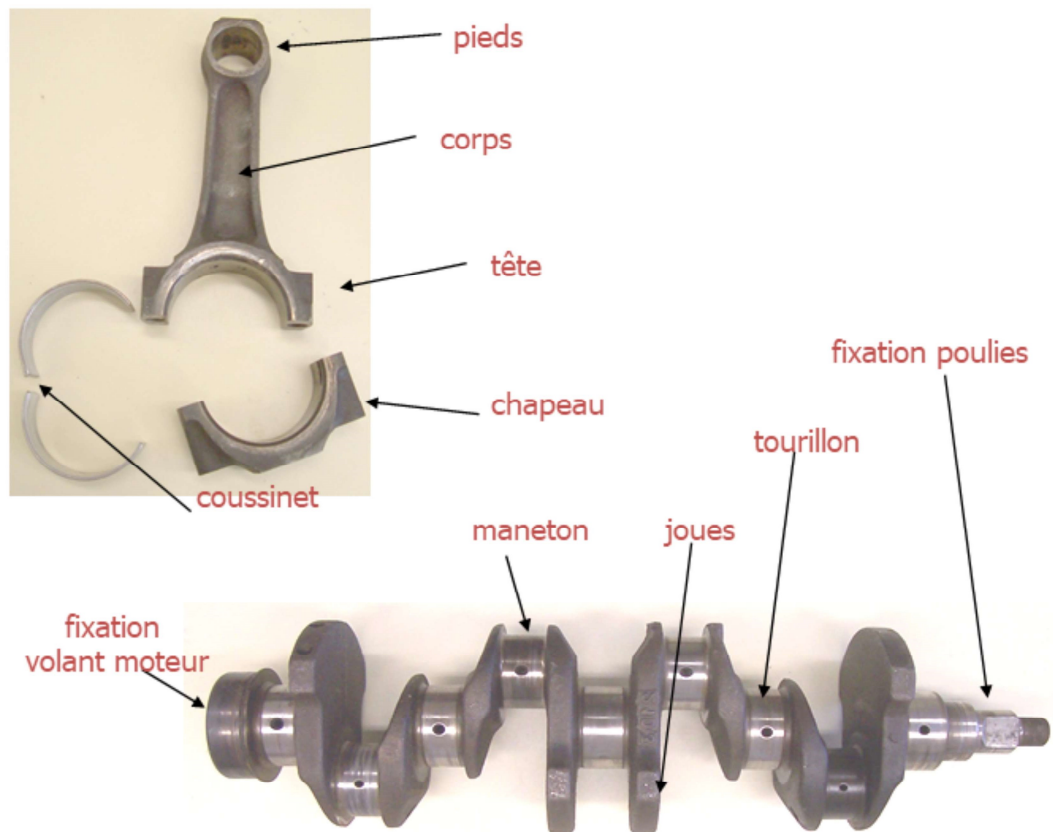
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



Les coussinets en régule (alliage antifricction à base de plomb) ont un point de fusion assez bas et ils ne survivent pas à la rupture du film d'huile dans le palier hydrodynamique (déjaugage...).

Mais le prix de ces coussinets est négligeable face au prix d'une bielle.

On observera les joues du vilebrequin qui équilibrent celui-ci.

***Elles forment aussi par barbotage un brouillard d'huile dans le carter.***

# Le piston

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

## ► Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

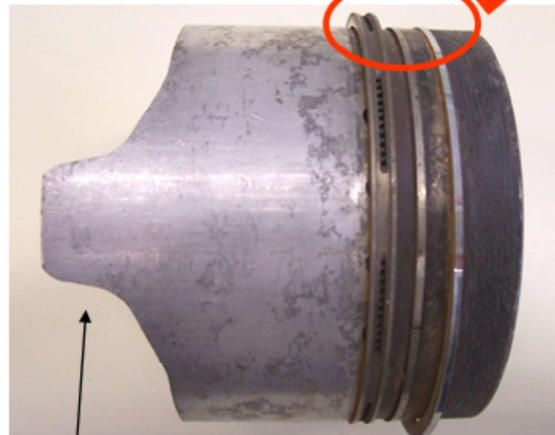
## Injection

Essence

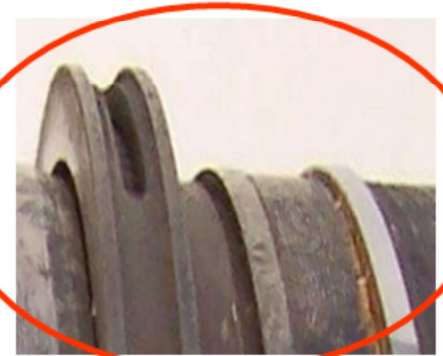
Diesel

## Allumage

Allumage



jupe



Segment  
racleur

Segment  
d'étanchéité

Segment  
pare-feu

La forme de la jupe du piston est justifiée par l'étude des forces de contact de la chemise sur le piston.

Ceux-ci s'exercent fortement d'avant en arrière (dans le plan contenant la bielle) mais sont faibles sur les cotés... d'où l'absence de matière à ces endroits où le guidage n'est pas remis en cause.



# Le carter et la culasse

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

## ► Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

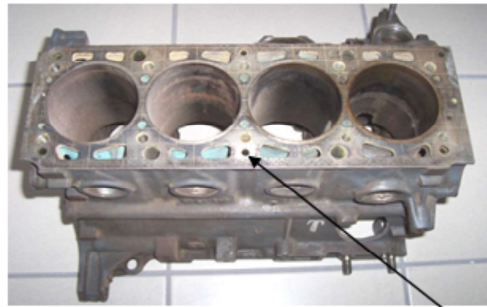
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



Carter humide  
chemisé dans la masse



Carter humide  
à chemise rapportée



Conduits de refroidissement  
et de lubrification

Plan de joint  
de culasse

La quasi-totalité des moteurs d'automobiles sont à carter humide.

La chemise rapportée est aujourd'hui largement majoritaire, elle favorise la réparation en cas d'avarie entre chemise et piston (serrage, usure...).

On comprend la fragilité du joint de culasse quand on observe le nombre de perforations dont il fait l'objet (conduits de refroidissement et de lubrification...).

⇒ On notera les pastilles de dessablage sur la culasse, pièce moulée parfois d'une grande complexité.

# Le refroidissement

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

► Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

Essence

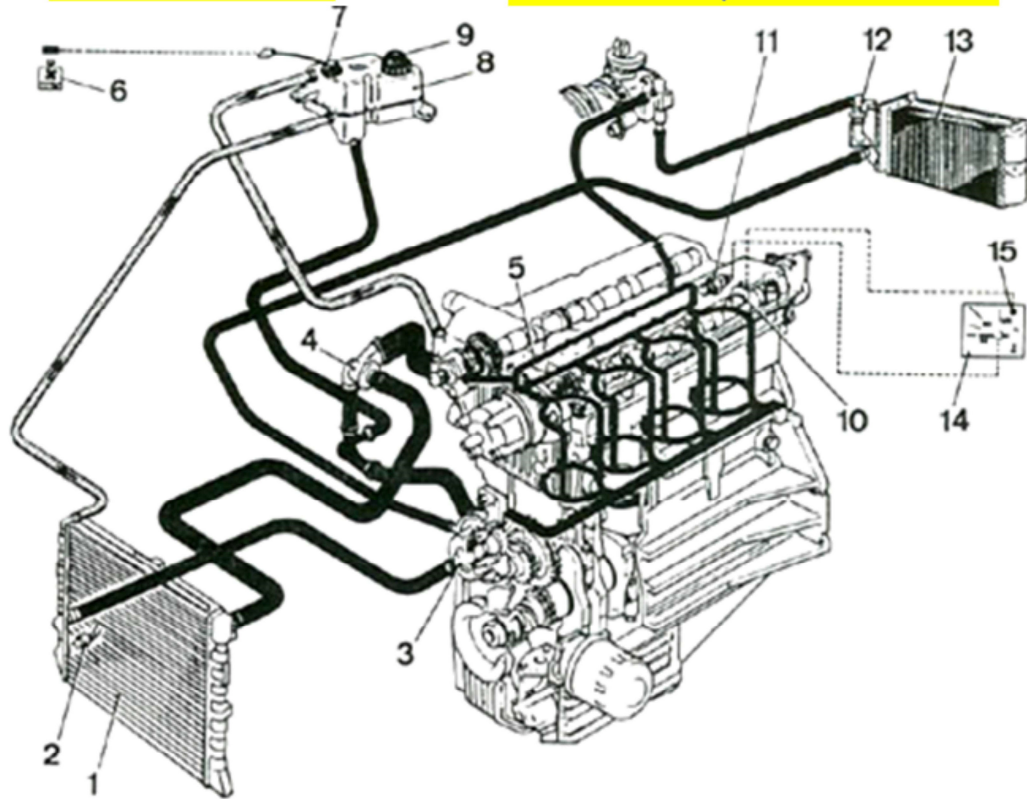
Diesel

## Allumage

Allumage

Rendement optimal

\* 120°C pour les chemises.  
\* 180 à 240°C pour la culasse



### 1. Radiateur

2. Sonde du ventilateur électrique

### 3. Pompe à eau

4. Soupape thermostatique

5. Culasse

6. Lampe témoin de niveau mini du liquide

7. Jauge à liquide

### 8. Réservoir d'expansion, l'eau chaude va augmenter en volume (+5% environ)

9. Bouchon du réservoir d'expansion

10. Sonde de température du liquide de refroidissement

11. Sonde température maxi du liquide de refroidissement

12. Robinet de chauffage

13. Radiateur de chauffage

14. Indicateur de température du liquide de refroidissement

15. Lampe témoin de température du liquide de refroidissement.

Le liquide de refroidissement est essentiellement composé d'eau déminéralisée et de glycol. Ce dernier lui garantit des propriétés antigel indispensables pour faire face aux conditions atmosphériques.

Des conduits et des cavités sont aménagés dans le bloc-cylindres et la culasse pour permettre la circulation du liquide de refroidissement. Après avoir traversé le moteur, le liquide parvient, par l'intermédiaire d'une durite, au réservoir supérieur du radiateur, d'où il s'écoule jusqu'au réservoir inférieur par une série de tubes pour être refroidi par l'air qui circule autour de ces tubes. Le liquide retourne alors au moteur par la durite de sortie du radiateur.

L'eau est utilisée aussi pour chauffer l'habitacle...

# Arbre à cames et soupapes

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

► Cames-Soupapes

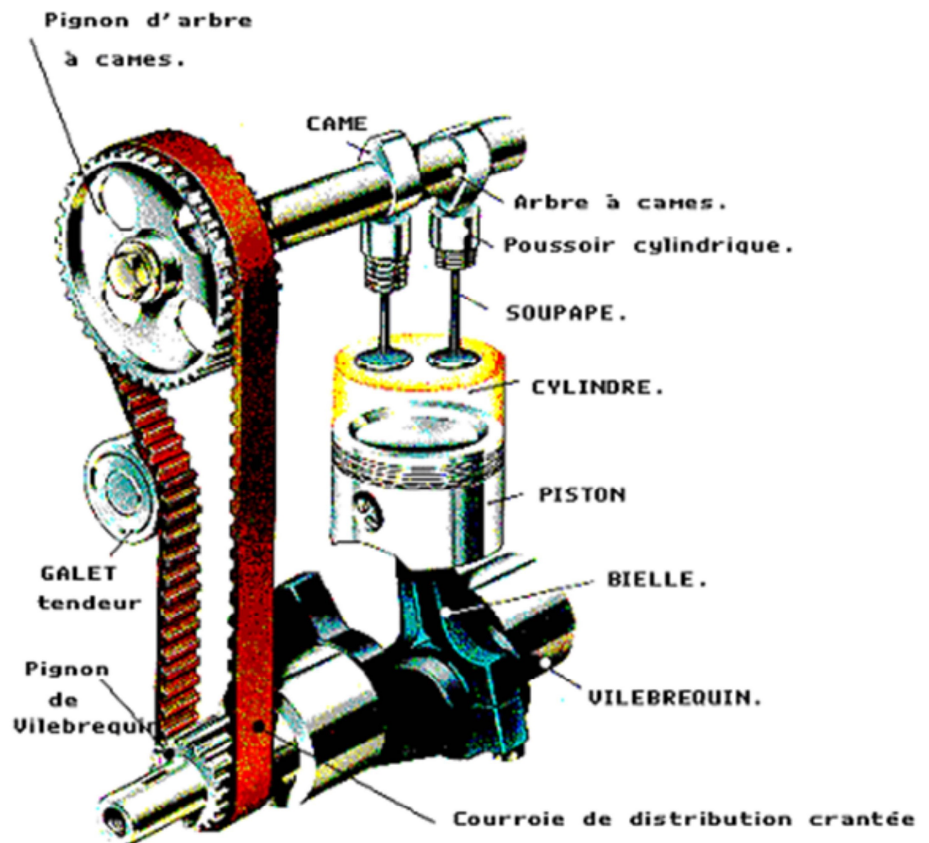
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



L'arbre à cames donne au moteur son « caractère ».

Il est **rigoureusement synchronisé** avec le vilebrequin afin de respecter le diagramme de distribution optimisant le fonctionnement :

$$N_{\text{came}} = \frac{N_{\text{moteur}}}{2}$$

Il est donc essentiellement commandé par **une transmission par obstacle** (engrenage, chaîne, courroie).

Il existe plusieurs façons de pousser les soupapes, on retiendra que plus le nombre de pièces augmente et plus le moteur est limité en performances.

**En effet l'ensemble perd en rigidité et se comporte comme un oscillateur dont la fréquence de résonance n'est pas très éloignée de la fréquence de rotation maximale de l'arbre à came.**

L'affolement des soupapes est la cause de la « zone rouge » pour un moteur.

On verra les améliorations possibles dans la partie 3...

# Arbre à cames et soupapes

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

▶ Cames-Soupapes

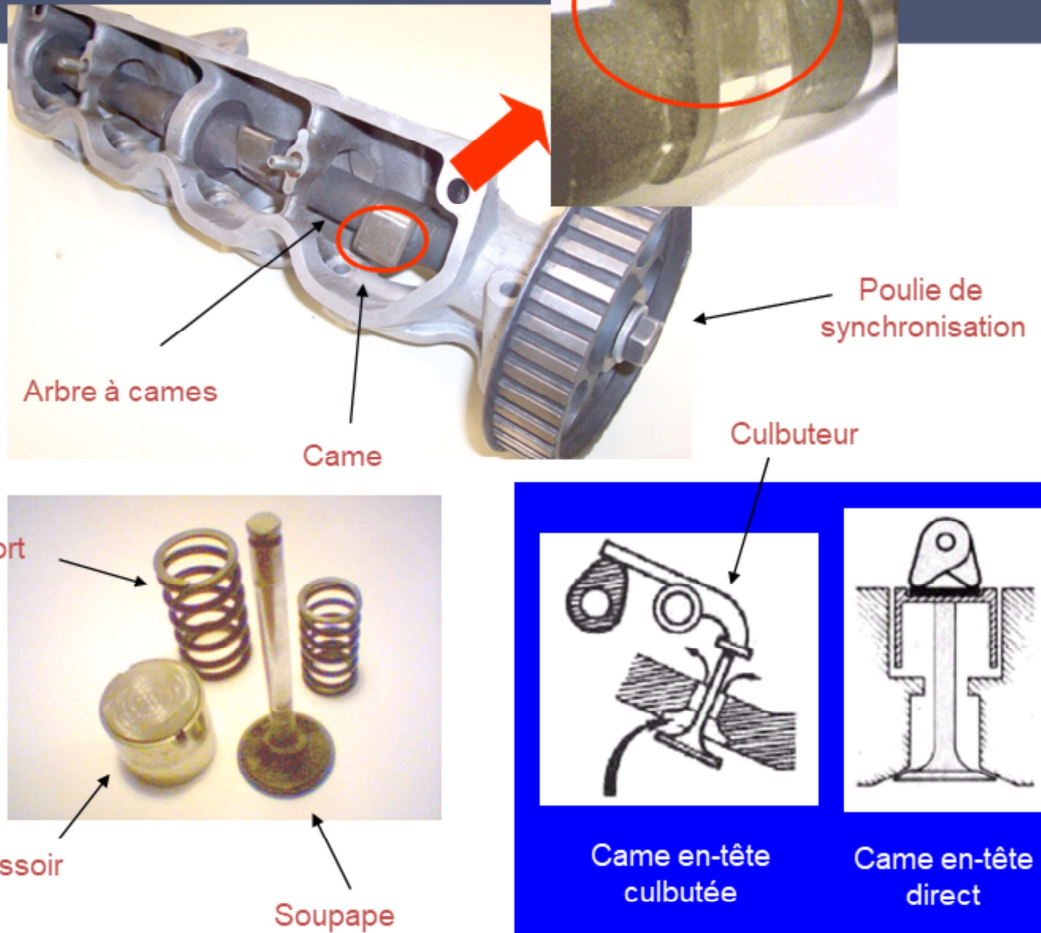
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage



Les arbres à cames en tête sont généralisés depuis les années 70.

L'arbre à cames culbuté, comportant davantage de pièces, est logiquement plus bruyant et moins performant que l'arbre à cames direct.

On trouve parfois les deux types dans un même moteur.

Un système de réglage du jeu aux soupapes est obligatoire pour tenir compte de la dilatation de l'ensemble.

Ce réglage peut aussi se faire automatiquement (cas des poussoirs hydrauliques, voir partie 3).



# L'injection essence

## Composition

### Éléments constitutifs

## Mécanique

### Mobilités

### Grippage

### Equilibrage

### Architecture

### Fabrication

### Bielle - Vilebrequin

### Piston

### Carter - Culasse

## Refroidissement

### Circuit

## Lubrification

### Circuit

## Distribution

### Cames-Soupapes

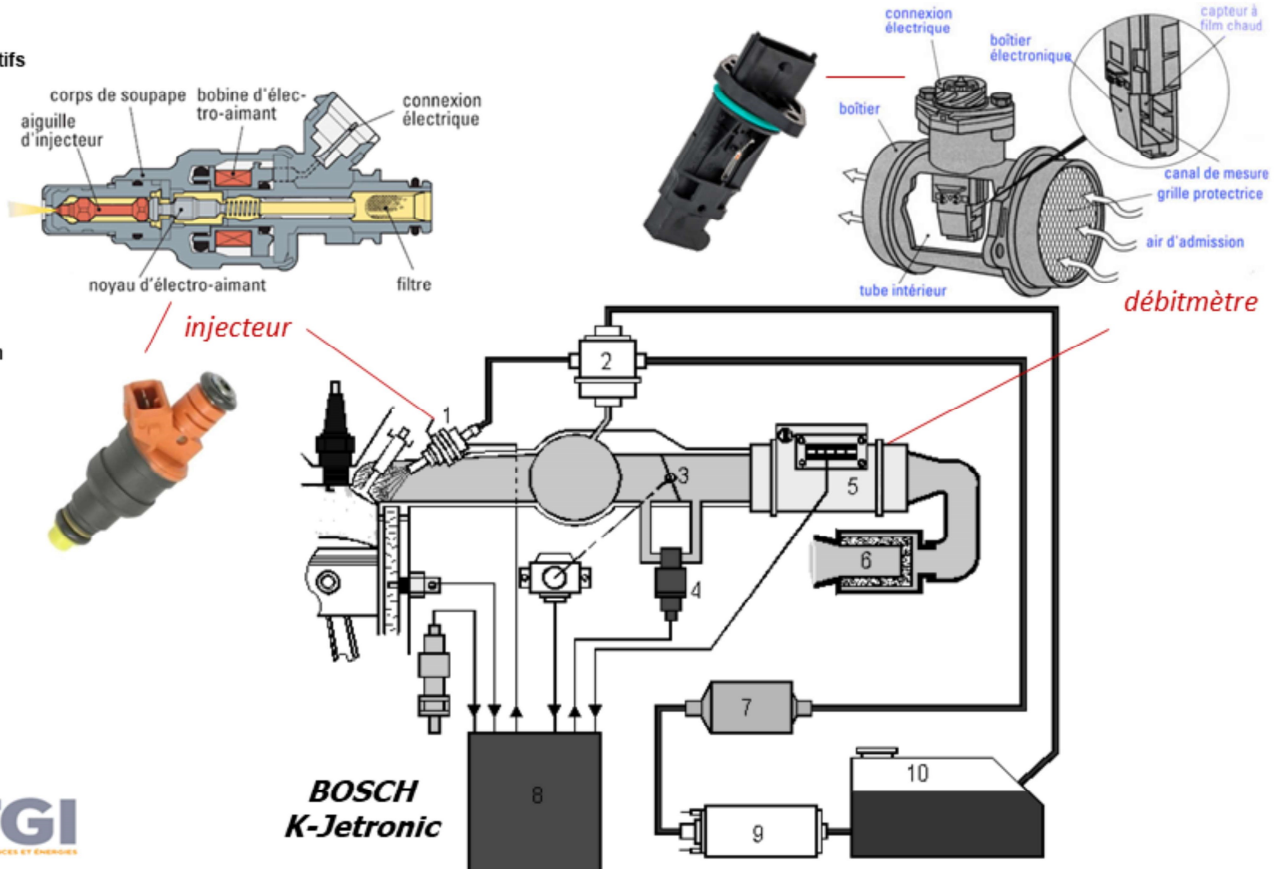
## Injection

### Essence

### Diesel

## Allumage

### Allumage



Par le passé les moteurs à essence des automobiles étaient alimentés par des carburateurs dont le principe de fonctionnement était basé sur l'effet Venturi. C'est ainsi que le débit d'air commandait par dépression (Cf théorème de Bernoulli) l'arrivée de l'essence dans la chambre de combustion.

Désormais l'essence est injectée dans le circuit d'admission, voir directement dans la chambre, par une pompe de gavage et des électrovannes (les injecteurs).

Le temps d'ouverture des injecteurs est calculé en fonction du débit d'air mesuré (mesure par fil chaud).

Ce système est plus fiable et permet de dresser des cartes d'injections sur mesure.

Il est à noter que la pompe aspire toujours plus d'essence que nécessaire, par sécurité. D'où le retour vers le réservoir...

**1: injecteur**

2: régulateur pression

3: papillon

4: ralenti

**5: débitmètre**

6: filtre à air

7: filtre à essence

**8: calculateur**

**9: pompe**

10 réservoir

# L'injection diesel

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

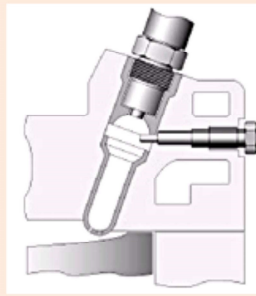
Essence

► Diesel

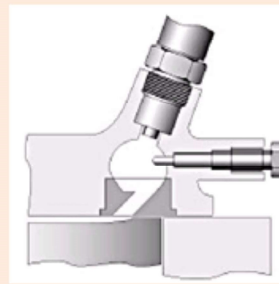
## Allumage

Allumage

### Diesel classique



préchambre



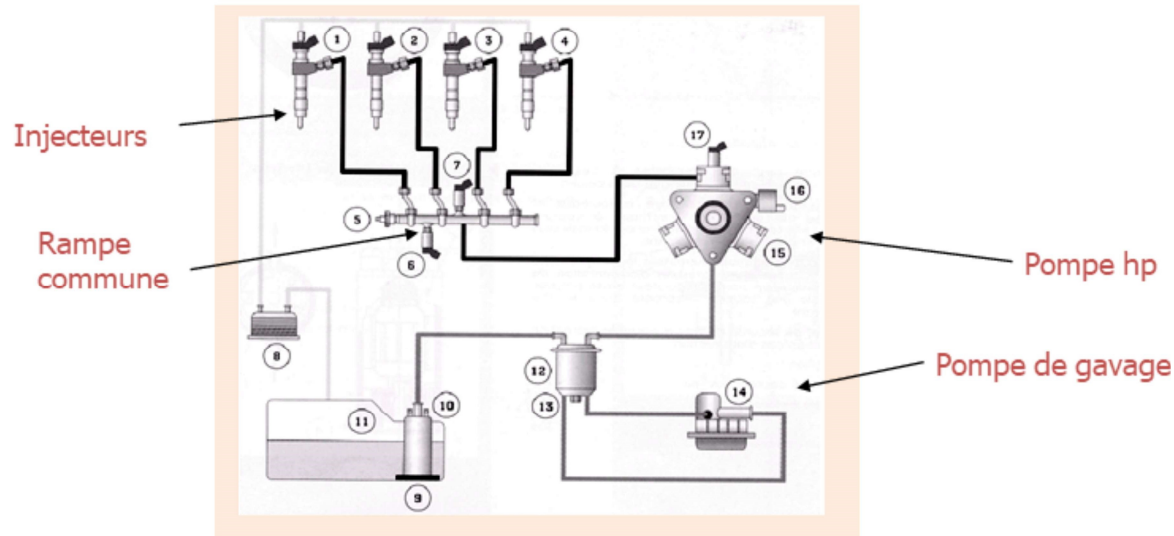
Chambre de turbulence

Injection indirecte

### HDI



V/S ↗ Qirr ↘  
Injection directe



L'injection diesel directe se passe de préchambre ou de chambre de turbulence (destinée à favoriser la combustion).

Le volume mort est creusé dans la tête du piston.

Relativement au volume la surface d'échange est plus faible, ainsi les pertes de chaleur sont réduites, un pas vers l'adiabaticisme...

# L'allumage

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

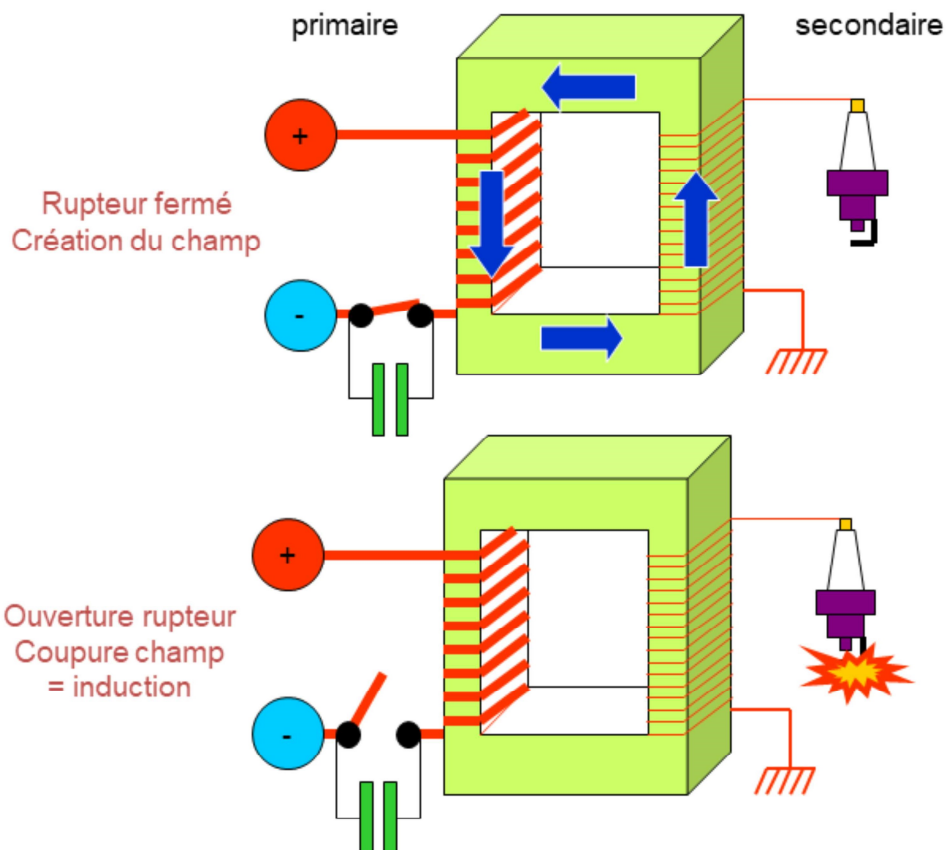
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

▶ Allumage



Le moteur à essence est à allumage commandé, via des étincelles aux bougies.

La tension de claquage de l'air ne peut être atteinte sans une **bobine d'induction**.

Le rupteur agit comme un interrupteur qui, lorsqu'il est fermé, permet via le bobinage primaire et la batterie de créer un champ magnétique continu dans un noyau (comme un électro-aimant).

L'ouverture du rupteur, commandée à partir du vilebrequin coupe brusquement ce champ. Cette **variation brutale de champ provoque l'induction d'un courant** dans le bobinage secondaire.

Le rapport des spires permet d'obtenir une tension suffisamment élevée aux bornes de la bougie pour produire l'étincelle (→ 30 000 V !!!)

# L'allumage

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

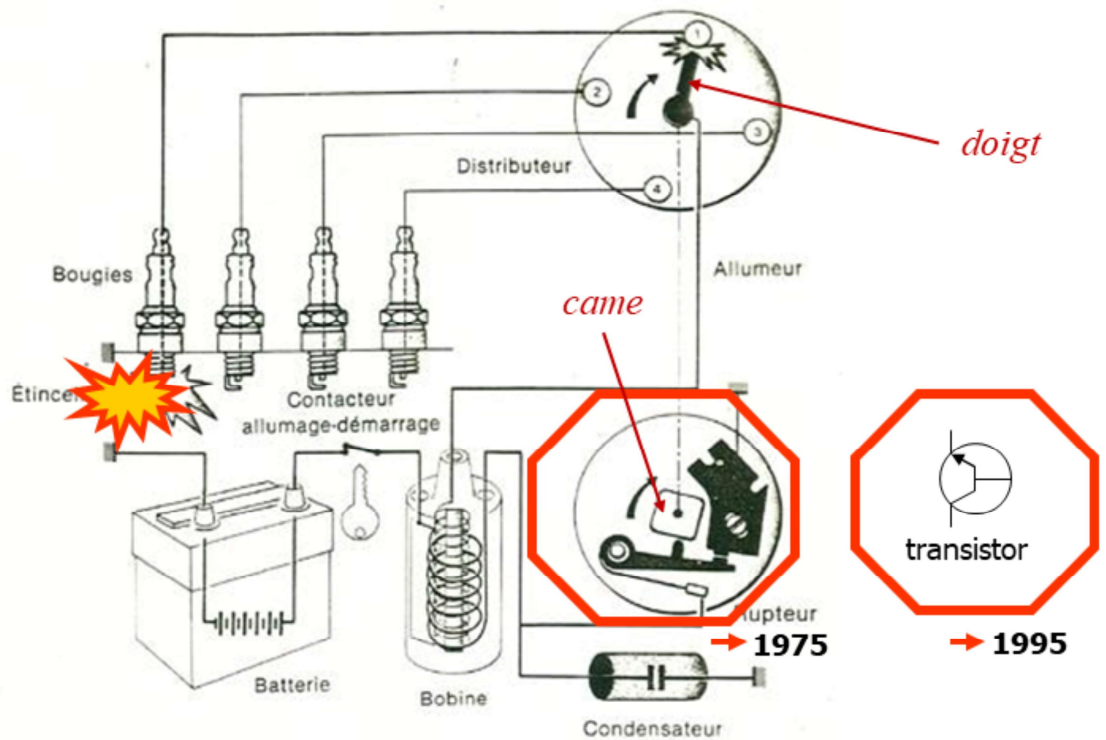
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

▶ Allumage



Allumage classique

En fait sur 2 tours de vilebrequin le rupteur s'ouvre et se ferme autant de fois qu'il y a de cylindres via une came.

C'est le rôle du distributeur de mettre en relation le bobinage secondaire avec la bougie adéquate via un doigt rotatif pour « distribuer l'étincelle ».

Ce système est désormais remplacé par l'électronique, plus fiable, mais il permet de bien comprendre le fonctionnement des séquences d'allumage.



# L'allumage

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

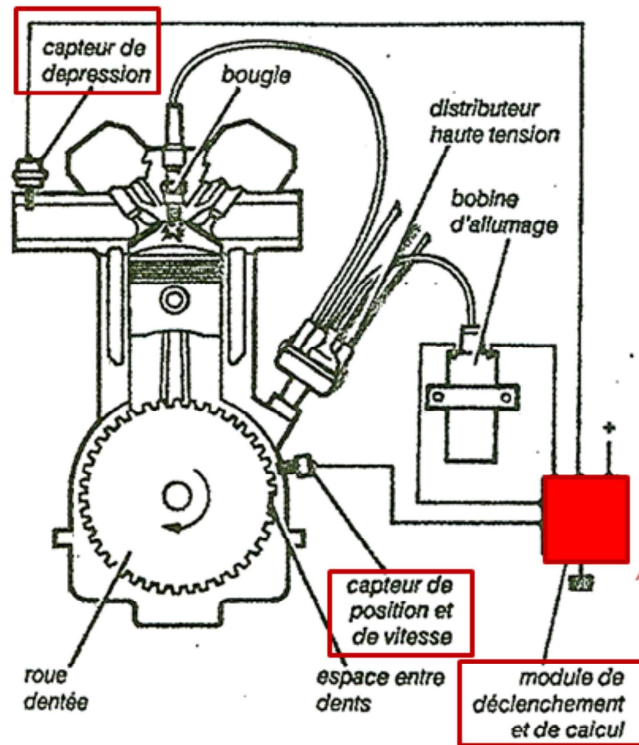
## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

▶ Allumage



▶ aujourd'hui

*Allumage électronique intégré*

On trouve donc aujourd'hui des allumages électroniques intégraux se passant de mécanique, le cœur du système étant alors constitué d'un calculateur renseigné par différents capteurs et assisté d'un système d'électronique de puissance...

# Application 4

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

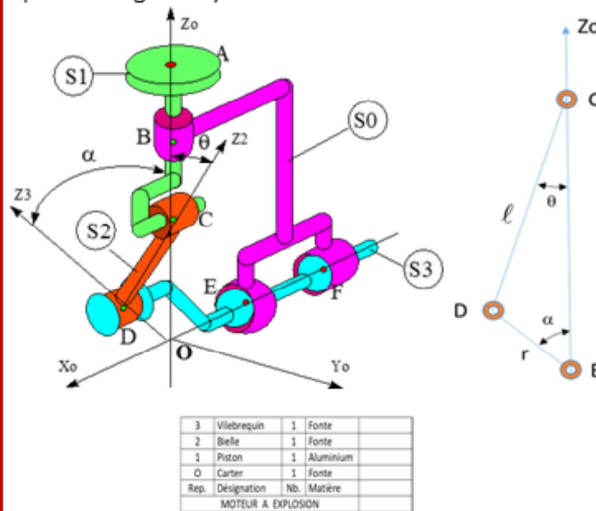
Essence

Diesel

## Allumage

Allumage

On considère le mouvement d'un piston au sein d'un moteur à combustion interne. On utilise le paramétrage du système bielle manivelle suivant :



On appelle  $\alpha'$  la vitesse de rotation de l'arbre du moteur (S3) supposée ici constante.

On note  $M$  la masse du piston.

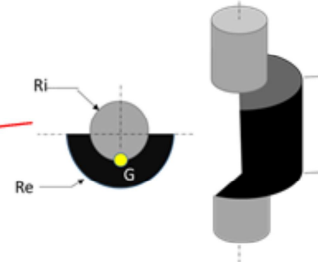
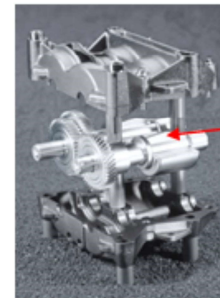
Le piston (S1) décrit une translation alternée. On peut montrer facilement qu'une valeur approchée de l'accélération du piston est :

$$z''(t) = -r\alpha'^2 \cdot \left\{ \cos\alpha + \frac{r}{l} \cdot \cos 2\alpha \right\}$$

## Travail demandé :

1 Montrer qu'il est théoriquement possible compenser l'effort d'inertie du second ordre, sources vibrations, en développant un effort opposé grâce à des arbres (masse volumique  $\rho$ ) rapportés au moteur.

2 La géométrie de l'arbre retenu est la suivante :



Déterminer  $Re$  et montrer que cet équilibrage est fait réalisable. Cette technique est connue sous le nom d'équilibrage de Lanchester.

- $M = 1 \text{ kg}$
- $r = 0.05 \text{ m}$
- $l = 0.14 \text{ m}$
- $Ri = 0.015 \text{ m}$
- $H = 0.10 \text{ m}$
- $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$

# Application 4

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage

# Application 4

## Composition

Éléments constitutifs

## Mécanique

Mobilités

Grippage

Equilibrage

Architecture

Fabrication

Bielle - Vilebrequin

Piston

Carter - Culasse

## Refroidissement

Circuit

## Lubrification

Circuit

## Distribution

Cames-Soupapes

## Injection

Essence

Diesel

## Allumage

Allumage

### Arbre de Lanchester

1/ Il y a compensation si :  $2 \cdot F_{ie} \cdot \cos \omega t = F_{i2}$

$$m \cdot \omega^2 \cdot R_i \cdot \cos 2\alpha = \frac{1}{2} M \cdot \alpha'^2 \cdot \frac{r^2}{l} \cdot \cos 2\alpha$$

$\downarrow$  Lieu de G  $\downarrow$  Chaque arbre  $\downarrow$  Masse piston  
Masse balourd contribue pour moitié

$$m \cdot \omega^2 \cdot R_i = \frac{1}{2} M \cdot \alpha'^2 \cdot \frac{r^2}{l}$$

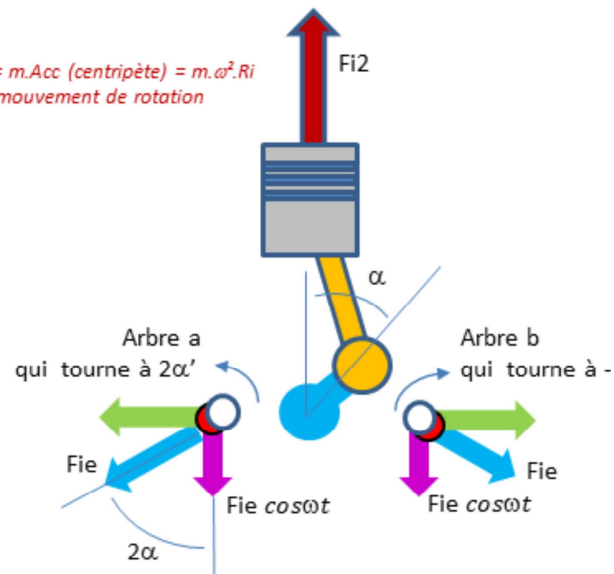
$$\omega = 2\alpha' \text{ et } \omega t = 2\alpha$$

$$2/\rho \cdot H \cdot \frac{\pi}{2} (R_e^2 - R_i^2) \cdot (2\alpha')^2 \cdot R_i = \frac{1}{2} M \cdot \alpha'^2 \cdot \frac{r^2}{l}$$

$$\rho \cdot H \cdot \pi \cdot (R_e^2 - R_i^2) \cdot 4 \cdot R_i = M \cdot \frac{r^2}{l}$$

$$R_e = \sqrt{\frac{1}{4} M \cdot \frac{r^2}{l \cdot \rho \cdot H \cdot \pi \cdot R_i} + R_i^2}$$

$F_{ie} = m \cdot \text{Acc (centripète)} = m \cdot \omega^2 \cdot R_i$   
car mouvement de rotation



$$\rightarrow \text{AN : } R_e = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 1 \cdot \frac{0,05^2}{0,14 \cdot 7800 \cdot 0,10 \cdot \pi \cdot 0,015} + 0,015^2} = 0,0186 \text{ m ou } 18,6 \text{ mm.}$$

$\rightarrow$  Tout à fait réalisable en terme d'encombrement.



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](mailto:ufr-stgi@univ-fcomte.fr)

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