

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

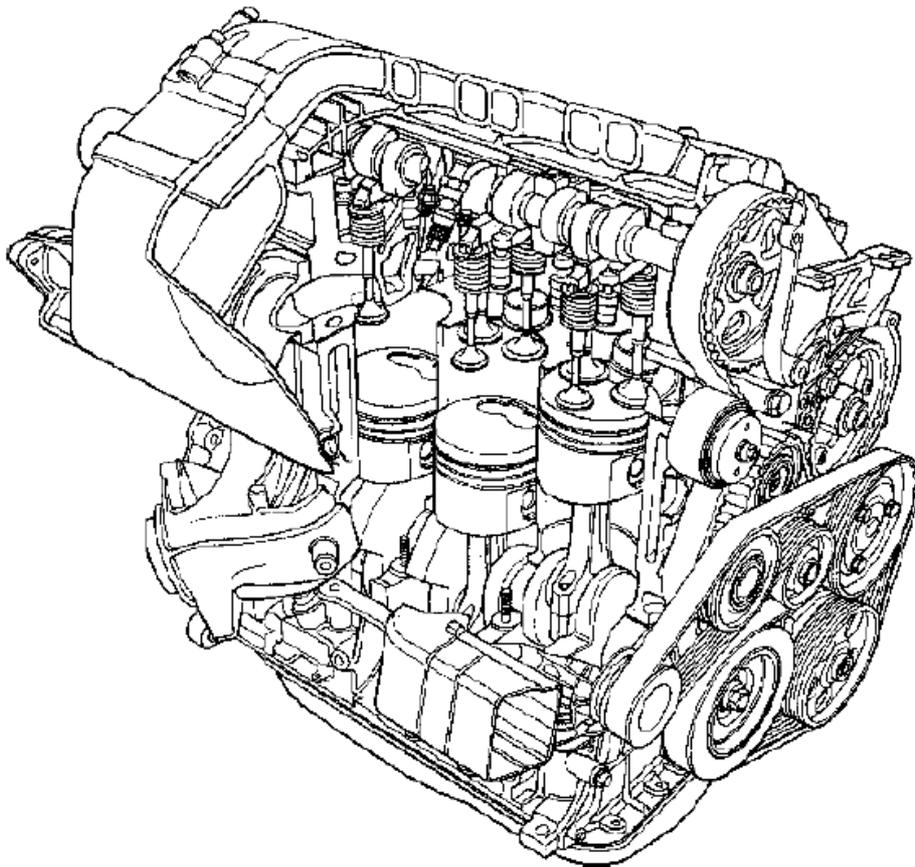


I.M.S.I

# *Polycopié de Cours*

# *Moteur Thermique*

Polycopié destiné aux étudiants de troisième année Licence LMD



*Elaboré par : Dr MEGHDIR .A*

2020 /2021

# *Introduction Générale*

Ce polycopié est destiné aux étudiants de troisième année de licence en électromécanique. Il leur servira de support de cours.

Il est constitué de six chapitres répartis de la manière suivante :

❖ Le premier chapitre portera sur des généralités de fonctionnement des Moteurs thermiques et plus en détail ceux à Combustion Interne.

❖ Le second chapitre comportera l'étude des différents cycles thermodynamiques des moteurs à quatre temps à allumage commandé et à allumage par compression, ainsi que ceux des moteurs à deux temps.

❖ Dans le troisième chapitre, nous étudierons en détail les différents organes fixes constituant le moteur à combustion interne. Nous verrons leurs rôles dans le fonctionnement, leurs fabrications, les caractéristiques mécaniques et thermiques qu'ils doivent avoir.

❖ Dans le quatrième chapitre, sera consacré aux organes mobiles du moteur à combustion interne et là aussi nous détaillerons leurs rôles, leurs fabrications, caractéristiques mécaniques et thermiques.

❖ le cinquième chapitre, quant à lui portera sur le système de distribution dans son ensemble et plus en détail chaque élément le constituant.

❖ Dans le sixième chapitre, nous parlerons des systèmes de suralimentation, de refroidissement avec ces différents modes et de lubrification.

<p style="text-align: center;"><b>Généralités sur le fonctionnement des Moteurs à Combustion Interne</b></p>
--

**I- Différents types de moteurs**

**II- Les moteurs à combustion interne**

1- Les turbines à gaz

2- Les réacteurs

3- Les moteurs alternatifs

**III- Les moteurs à quatre temps**

1- Description du moteur élémentaire

2- Principe de fonctionnement

**IV- Les moteurs à deux temps**

1- Description

2- Fonctionnement du moteur à allumage commandé

3- Fonctionnement du moteur à allumage par compression

Généralités sur le  
fonctionnement des M.A.C.I

### I- Différents types de moteurs

Le moteur est une machine qui transforme une énergie quelconque en une énergie mécanique.

#### Exemples :

##### - Moteurs hydrauliques

Une roue à aubes entraînée par une chute d'eau (barrage de montagne) ou une rivière.

**Utilisation :** Centrale hydraulique

##### - Moteurs à air comprimé

Ils utilisent l'énergie de pression de l'air

**Utilisation :** Outils à air comprimé utilisés dans les usines ou dans les chantiers

##### - Moteurs électriques

L'énergie électrique est utilisée pour créer un champ magnétique qui provoque la rotation d'un arbre.

**Utilisation :** - Entraînement de machines (tour, fraiseuse, ...)

- Véhicules

- Petits mécanismes (électroménager, .....)

##### - Moteurs thermiques

L'énergie consommée est l'énergie chimique d'un mélange air-combustible.

C'est les moteurs thermiques que nous étudierons en particulier dans ce cours.

### II- Les moteurs à combustion interne

On classe dans cette catégorie tous les moteurs pour lesquels la combustion du mélange air-combustible et la libération de l'énergie chimique sous forme de chaleur se fait à l'intérieur du moteur. Il existe plusieurs types de moteurs à combustion interne.

#### 1- Les turbines à gaz

C'est un moteur à flux continu. L'air admis dans la turbine est d'abord comprimé dans un compresseur pour ensuite passer dans une chambre de combustion (tube à flamme). Le mélange air-hydrocarbure brûle en continu. Les gaz brûlés à haute température et grande vitesse sont canalisés vers les ailettes d'une turbine. Leur énergie cinétique est transformée par ces ailettes en énergie mécanique récupérée sur un arbre moteur.

**Utilisation :** Entraînement d'alternateurs, de compresseurs....

## 2- Les réacteurs

Son fonctionnement est le même que celui d'une turbine à gaz, sauf que les gaz brûlés sortant du tube à flamme sont directement éjectés dans l'atmosphère et leur énergie cinétique sert à fournir une poussée.

**Utilisation :** Propulsion d'avion.

## 3- Les moteurs alternatifs à combustion interne M.A.C.I

On y trouve la même succession de phases que pour les moteurs à flux continu :

- Admission d'air ou de mélange air-combustible.
- Compression d'air ou de mélange.
- Combustion du mélange.
- Récupération de l'énergie des gaz brûlés.
- Echappement des gaz brûlés.

Dans un moteur à flux continu, toutes ces phases se produisent simultanément dans différentes parties du moteur.

Dans un moteur alternatif à combustion interne, toutes ces phases ont lieu dans une même enceinte et se déroulent successivement.

Les moteurs alternatifs à combustion interne sont classés comme suit :

- ❖ Les moteurs à allumage par compression (moteurs diesel), le combustible utilisé est le gaz-oil ou le fuel N°1.

**Utilisation :** Véhicules automobiles, camions, groupes électrogènes, .....

- ❖ Les moteurs à allumage commandé (moteurs à explosion), le combustible utilisé est de l'essence ou le supercarburant.

**Utilisation :** Véhicules automobiles

Le gaz peut être utilisé comme combustible dans les deux types de moteurs ci-dessus.

## III- Les moteurs à quatre temps

### 1- Description du moteur élémentaire

Le piston coulisse à l'intérieur d'un cylindre. Il est animé d'un mouvement alternatif. La bielle transforme ce mouvement en mouvement de rotation du vilebrequin. Les soupapes sont des obturateurs qui sont normalement fermés et qui peuvent s'ouvrir pour laisser les gaz et le combustible (Figure I.1).

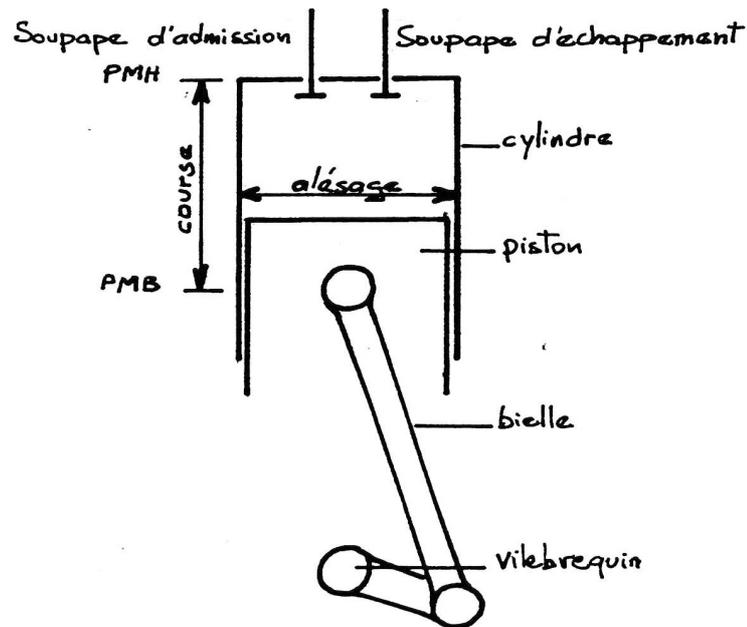


Figure I.1- Représentation schématique d'un moteur à quatre temps

### Définitions

❖ **Point mort haut PMH :**

C'est la position la plus haute du piston.

❖ **Point mort bas PMB :**

C'est la position la plus basse du piston.

❖ **La course :**

C'est la distance parcouru par le piston entre le PMH et le PMB

❖ **La cylindrée unitaire :**

C'est dans le cylindre, le volume compris entre le PMH et le PMB.

❖ **La cylindrée totale V :**

Quand un moteur a plusieurs cylindres, la cylindrée totale est la somme des cylindrées unitaires.

❖ **Espace mort v :**

C'est le volume situé au-dessus du piston quand il est au PMH.

❖ **Rapport volumétrique de compression :**

C'est le rapport du volume quand le piston est au PMB ( $V+v$ ), sur l'espace mort ( $v$ )

$$\varepsilon = \frac{V+v}{v}$$

I.1

❖ **L'alésage :**

C'est le diamètre du cylindre.

## 2- Principe de fonctionnement

Nous avons vu que pour les MACI plusieurs phases se succédaient dans une même enceinte, le cylindre.

- a- **Un cycle** est l'ensemble de ces phases. Quand un cycle est accompli, le moteur se retrouve dans son état initial prêt à recommencer un nouveau cycle.
- b- **Un temps** est la partie d'un cycle correspondant à une course du piston :
  - Course ascendante du PMB vers PMH
  - Course descendante du PMH vers PMB

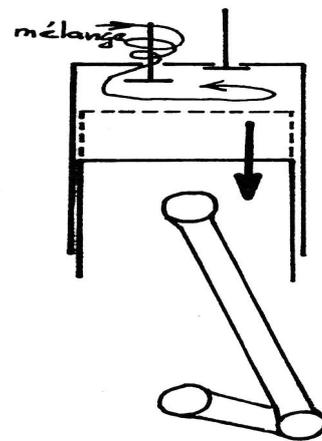
Un moteur à quatre temps est un moteur dans lequel quatre courses du piston sont nécessaires pour accomplir un cycle

### c- Fonctionnement du moteur à allumage commandé

Le cycle qui donne le meilleur rendement pour les MACI est le cycle Beau de Rochas. Prenons comme point de départ d'un cycle le piston est au PMH et les soupapes sont fermées.

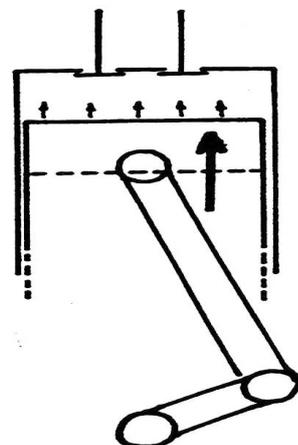
#### 1<sup>er</sup> temps : Admission

La soupape d'admission s'ouvre.  
Le piston descend du PMH au PMB.  
Il aspire des gaz frais (mélange air-essence) qui occupe tout le volume au-dessus de piston.  
Pendant la course descendante du piston le vilebrequin effectue une demi rotation.



#### 2<sup>ème</sup> temps : Compression

La soupape d'admission se ferme.  
Le piston remonte du PMB au PMH.  
IL comprime les gaz frais dans l'espace mort.



### Allumage

Quand le piston est au PMH, on provoque dans l'espace mort une étincelle qui enflamme le mélange. En théorie, on considère que la combustion est instantanée.

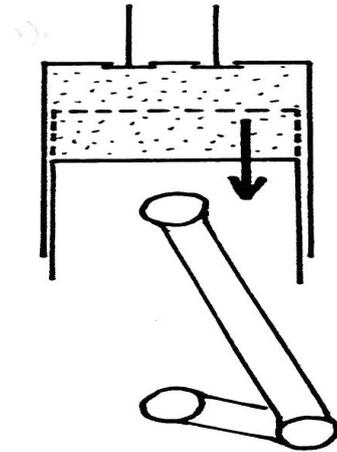
### 3<sup>ième</sup> temps : Détente

Les soupapes sont toujours fermées.

Les gaz brûlés sous forte pression, repoussent le piston du PMH au PMB.

C'est pendant le 3<sup>ième</sup> temps que l'énergie chimique du mélange air-essence est transformée en énergie mécanique fournie au piston.

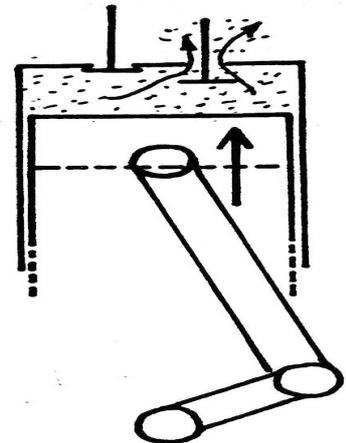
C'est le seul temps moteur.



### 4<sup>ième</sup> temps : Echaappement

La soupape d'échappement s'ouvre instantanément, une partie des gaz brûlés s'échappe, jusqu'à ce que la pression dans le cylindre soit égale à la pression atmosphérique. C'est la bouffée d'échappement. Puis le piston se déplace du PMB au PMH refoulant le reste des gaz brûlés.

Quand le piston arrive au PMH, le cycle est terminé. Le moteur se retrouve dans le même état qu'au début du Premier temps, prêt à recommencer un nouveau cycle.



### **d- Fonctionnement du moteur à allumage par compression (Diesel)**

Le cycle présente quelques différences avec celui du moteur à allumage commandé.

Le rapport volumétrique de compression est très élevé. L'air comprimé dans l'espace mort en fin du 2<sup>ième</sup> temps est donc très chaud. On injecte à ce moment du gaz-oil qui, à cette température s'enflamme spontanément. La combustion se poursuit pendant la descente du piston.

**1<sup>er</sup> temps :** Admission d'air seul

**2<sup>ième</sup> temps :** Compression de l'air

Injection du gaz-oil qui s'enflamme spontanément

**3<sup>ème</sup> temps** : Détente des gaz brûlés pendant que la combustion se poursuit.

**4<sup>ème</sup> temps** : Echappement des gaz brûlés

#### IV- Moteur à deux temps

##### 1- Description

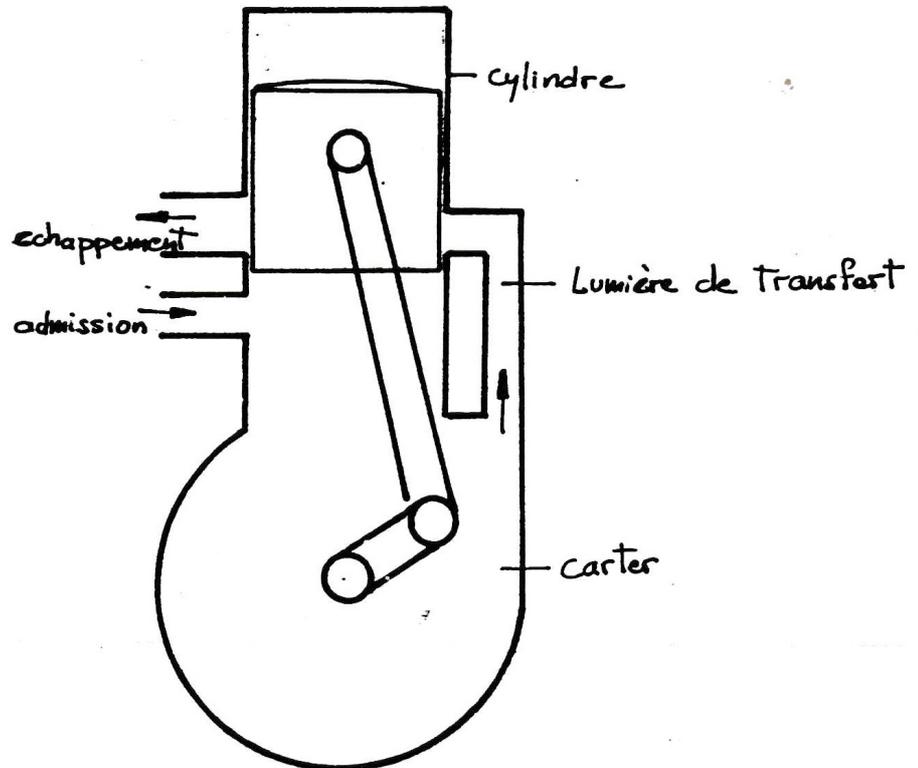


Figure I.2- Description du moteur à 2 Temps

Ce moteur ne comporte pas de soupapes. C'est le piston qui obture ou découvre des orifices pratiqués dans le cylindre et appelées lumières.

Le moteur comporte trois types de lumières :

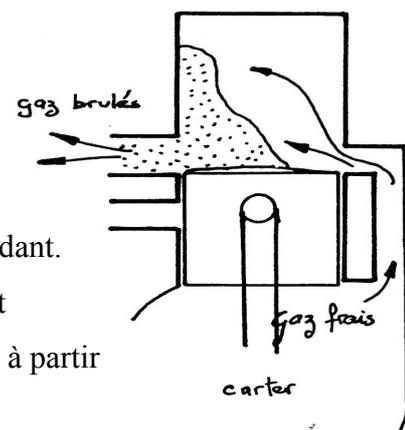
- D'admission qui communique avec le carter sous le piston.
- D'échappement qui communique avec le cylindre au-dessus du piston.
- De transfert qui fait correspondre le carter avec le cylindre.

##### 2- Fonctionnement du moteur à allumage commandé

###### 1<sup>er</sup> temps : Compression

Le piston est au PMB, les gaz frais venant du carter et passant par la lumière de transfert, finissent par chasser les gaz brûlés présent dans le cylindre pendant le temps précédent.

Le piston remonte du PMB au PMH, il obture successivement les lumières de transfert et d'échappement. Les gaz frais sont, à partir



De ce moment comprimés dans le cylindre jusqu'à occuper le volume mort.

### Allumage

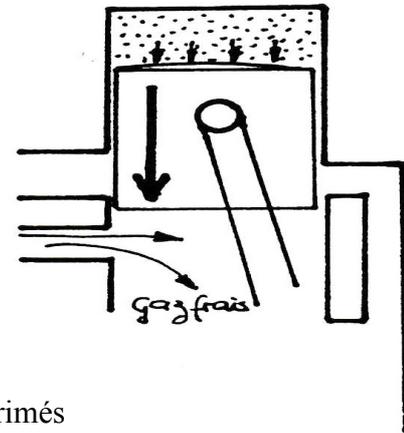
On provoque avec une étincelle la combustion du mélange air-essence. La combustion est instantanée et se fait donc à volume constant.

### 2<sup>ème</sup> temps : Détente

Le piston est au PMH, la lumière d'admission est découverte les gaz frais peuvent pénétrer dans le carter sous le piston les gaz brûlés repoussent le piston qui descend.

Dès que la lumière d'admission est obturée par le piston, les gaz frais commencent à être comprimés dans le carter, puis la lumière d'échappement est découverte et une bouffée des gaz brûlés s'échappent.

Enfin la lumière de transfert se découvre et les gaz frais comprimés dans le carter remontent dans le cylindre et finissent de chasser les gaz brûlés restant. Ainsi le cycle est bouclé.



### 3- Fonctionnement du moteur à allumage par compression

Le fonctionnement peut différer sensiblement du moteur à allumage commandé.

#### ➤ Par l'alimentation en air

Au lieu de comprimer les gaz frais dans le carter, on utilise un compresseur annexe, entraîné par le moteur lui-même. On obtient ainsi une grande régularité de la pression d'alimentation et on utilise plus le carter pour le passage de l'air.

#### ➤ Par l'échappement des gaz brûlés

On peut remplacer la lumière d'échappement par une soupape. Contrairement à l'échappement par lumière, on pourra alors prolonger la détente des gaz brûlés jusqu'au PMB. On aura donc un meilleur rendement.

Le cycle est le même que pour un moteur à allumage commandé (essence), si on remplace l'allumage par l'injection de gaz-oil.

## Représentation des cycles sur un diagramme P,V

### **I- Généralités – Représentations des transformations thermodynamiques**

#### **II- Cycle théorique à quatre temps**

- 1- Hypothèses sur le fonctionnement du moteur**
- 2- Diagramme du cycle Beau de Rochas**
- 3- Diagramme du cycle Diesel**
- 4- Diagramme du cycle mixte**

#### **III- Cycle réel à quatre temps**

- 1- Diagramme pratique**
- 2- Modification du cycle théorique – Cycle réel**
- 3- Epure de distribution**
- 4- Diagramme du cycle réel**
- 5- Ordre de grandeur du cycle théorique 4 temps**

#### **IV- Cycle théorique à deux temps**

- 1- Diagramme du cycle à allumage commandé**
- 2- Diagramme du cycle à allumage par compression**

#### **V- Cycle réel à deux temps**

#### **VI- Domaines d'utilisation des moteurs**

- 1- Moteurs à deux temps**
- 2- Moteurs à quatre temps**

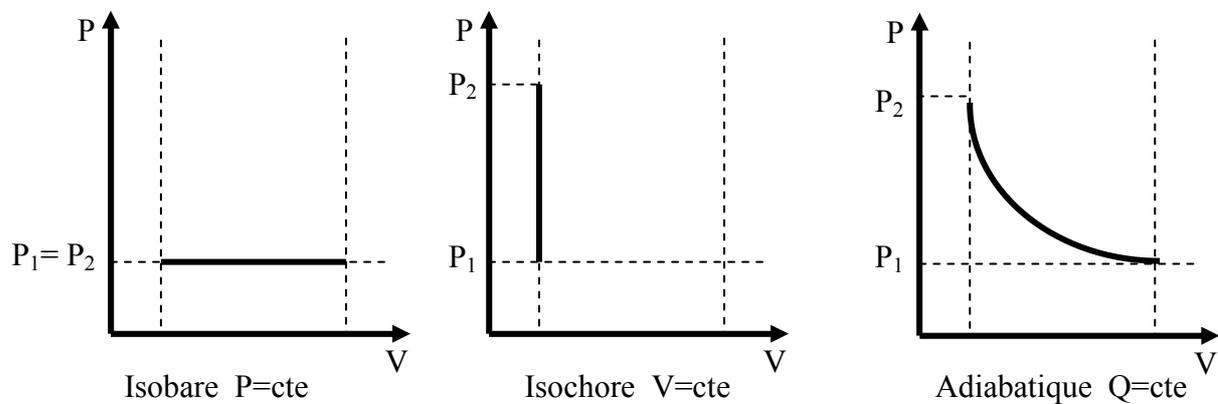
## Représentation des cycles sur un diagramme P,V

### I- Généralités – Représentations des transformations thermodynamiques

Les gaz frais et brûlés doivent passer par plusieurs états de pression, volume et température pour fournir leur énergie chimique sous forme d'énergie mécanique.

On représentera leur évolution sur un diagramme où la pression des gaz est portée en ordonnée et leur volume en abscisse.

Exemple d'évolutions représentées graphiquement



Pour l'étude nous représenterons, en abscisse le volume occupé par les gaz dans le cylindre au dessus du piston et en ordonnée leur pression.

Nous ne tiendrons pas compte des échanges gazeux avec l'extérieur ni des changements d'état chimique.

## II- Cycle théorique à quatre temps

### 1- Hypothèses sur le fonctionnement du moteur

➤ **L'inertie des gaz est nulle**

Conséquence : La pression s'équilibre instantanément avec l'extérieur dès l'ouverture des soupapes.

➤ **Ouverture instantanée des soupapes**

Conséquence : les mouvements des gaz sont instantanés. Il n'y a pas de période transitoire.

➤ **Les gaz ne sont pas laminés**

Conséquence : Ils ne subissent pas de laminage au passage des orifices.

➤ **La combustion est instantanée**

Conséquence : L'apport de chaleur est instantané et se fait donc à volume constant.

➤ **La compression et la détente sont adiabatiques :**

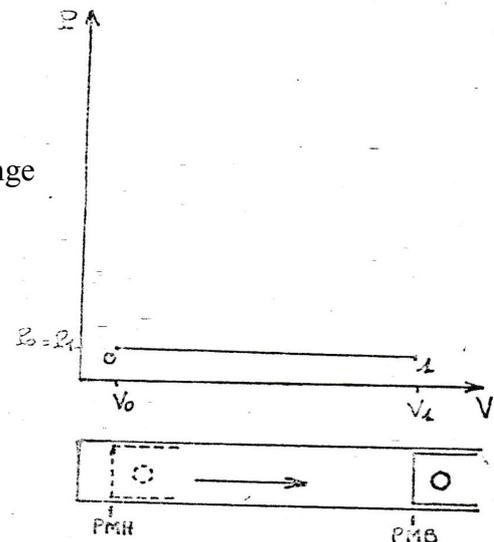
Conséquence : On n'a pas d'échange de chaleur avec l'extérieur pendant ces deux phases.

**2- Diagramme Beau de Rochas**

C'est suivant ce cycle que fonctionne le moteur à allumage commandé. C'est en effet lui qui donne le meilleur rendement donc la plus faible consommation pour ce type de moteur.

**1<sup>er</sup> Temps : Admission**

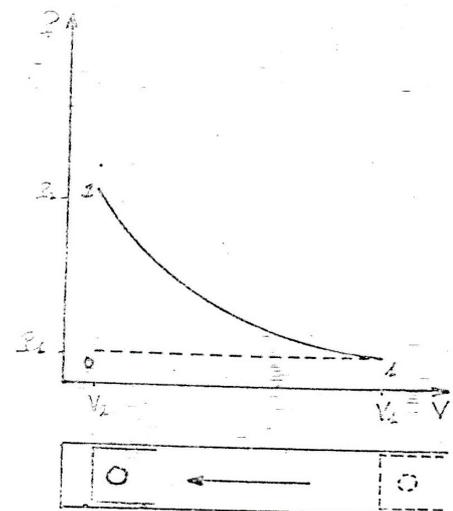
- Le piston est au PMH.
- La soupape d'admission s'ouvre
- Le piston descend du PMH au PMB Le mélange gazeux occupe le volume ainsi découvert.
- Les gaz ne subissent aucune perte de charge, la pression pendant toute l'admission est la pression atmosphérique.
- Le volume varie de  $V_0 = v$  à  $V_1 = V+v$
- La température reste constante



**2<sup>ème</sup> Temps : Compression**

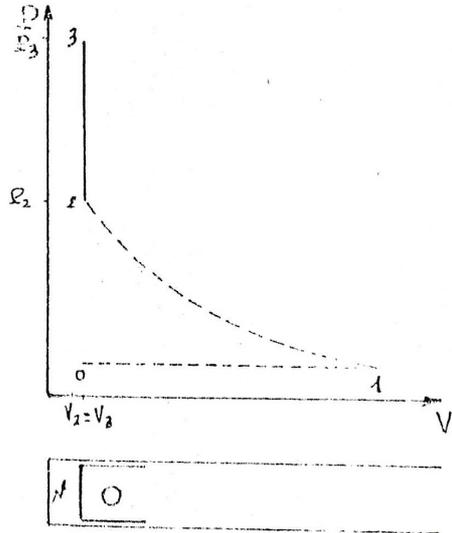
- La soupape d'admission se ferme.
- Les gaz frais sont comprimés adiabatiquement par le piston qui remonte du PMB au PMH.
- La pression augmente de  $P_1 \longrightarrow P_2$
- Le volume diminue  $V_1 \longrightarrow V_2$
- La température augmente  $T_1 \longrightarrow T_2$
- C'est trois grandeurs sont reliées par les relations

$$\frac{PV}{T} = C_1 \quad \text{et} \quad PV^\gamma = C_2$$



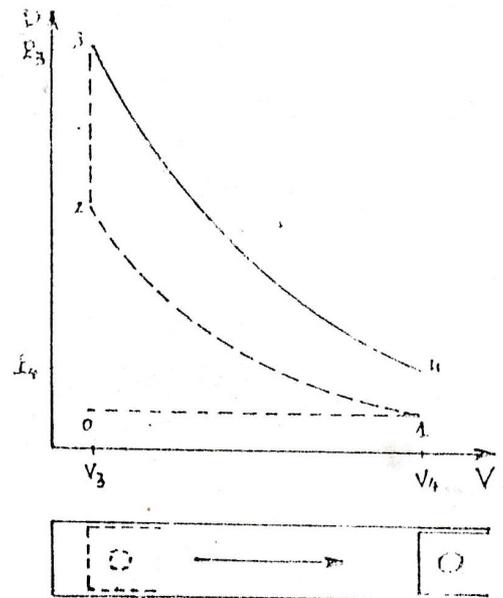
Allumage

- Le piston est au PMH
- On provoque la combustion en faisant jaillir une étincelle entre les électrodes d'une bougie.
- On passe dans le cylindre des gaz frais à l'état  $P_2, V_2, T_2$  au gaz brûlés à l'état  $P_3, V_3, T_3$  où  $P_3 > P_2, T_3 > T_2$  et  $V_2 = V_3$



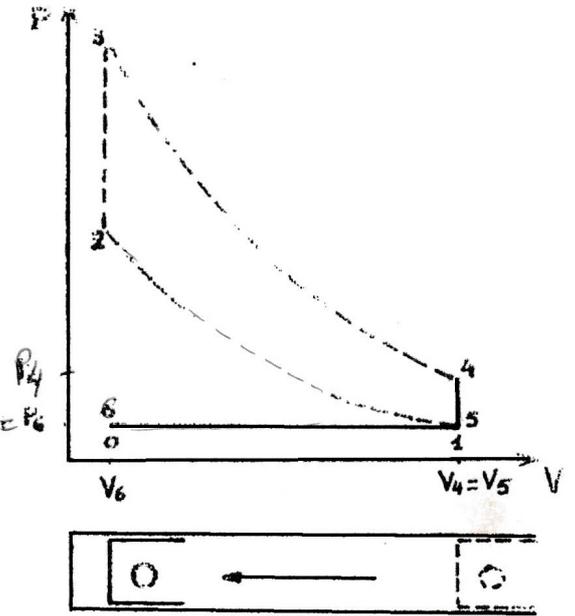
3<sup>ème</sup> Temps : Détente

- Les gaz brûlés sous forte pression repoussent le Piston du PMH vers le PMB, c'est le temps moteur, le seul temps où les gaz fournissent de l'énergie au moteur.
- La détente étant adiabatique, les pressions, volumes et températures sont modifiés.  $P_3 > P_4, T_3 > T_4$  et  $V_3 < V_4$
- C'est trois grandeurs sont reliées par les relations  $\frac{PV}{T} = C_1$  et  $P V^\gamma = C_2$



4<sup>ème</sup> Temps : Echappement

- L'échappement des gaz brulés se divise en Deux phases :
  - Au moment de l'ouverture de la soupape D'échappement, la pression s'équilibre Instantanément avec la pression extérieure C'est la bouffée d'échappement.  $P_5 < P_4$  et  $V_5 = V_4$
  - Pendant le quatrième temps le piston remonte du PMB au PMH en expulsant les gaz brulés à pression constante.  $P_5 = P_6$  et  $V_5 > V_6$



**Remarque :**

Pendant la bouffée d'échappement, les gaz brulés continuent leur détente adiabatique, mais leur volume augmente en dehors du cylindre, c'est pour cela que la bouffée d'échappement parait comme une transformation à volume constant.

Diagramme complet du cycle Beau de Rachas

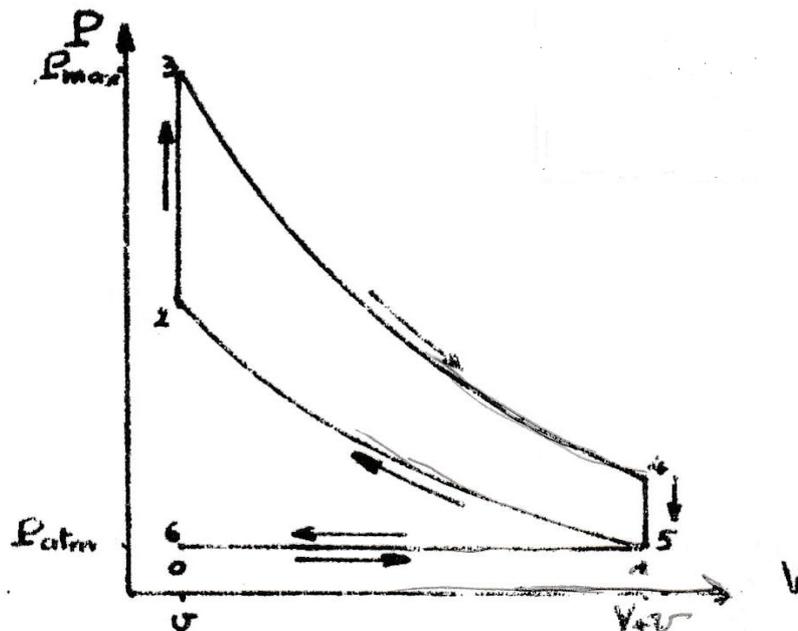


Figure II.1- Représentation du cycle théorique à 4 temps à allumage commandé



Cette combustion peut alors être schématisée comme suit :

- Une partie du gaz-oil brule à volume constant quand le piston atteint le PMH.  
Le complément brule à pression constante pendant la course descendante du piston.

Si on appelle  $Q$  la quantité totale de gaz-oil brûlée, une fraction  $\alpha.Q$  brûle à volume constant et le complément  $(1-\alpha)Q$  brûle à pression constante.

L'allure du cycle mixte sera alors comme suit :

**Diagramme complet du cycle  
théorique Diesel semi-rapide / rapide**

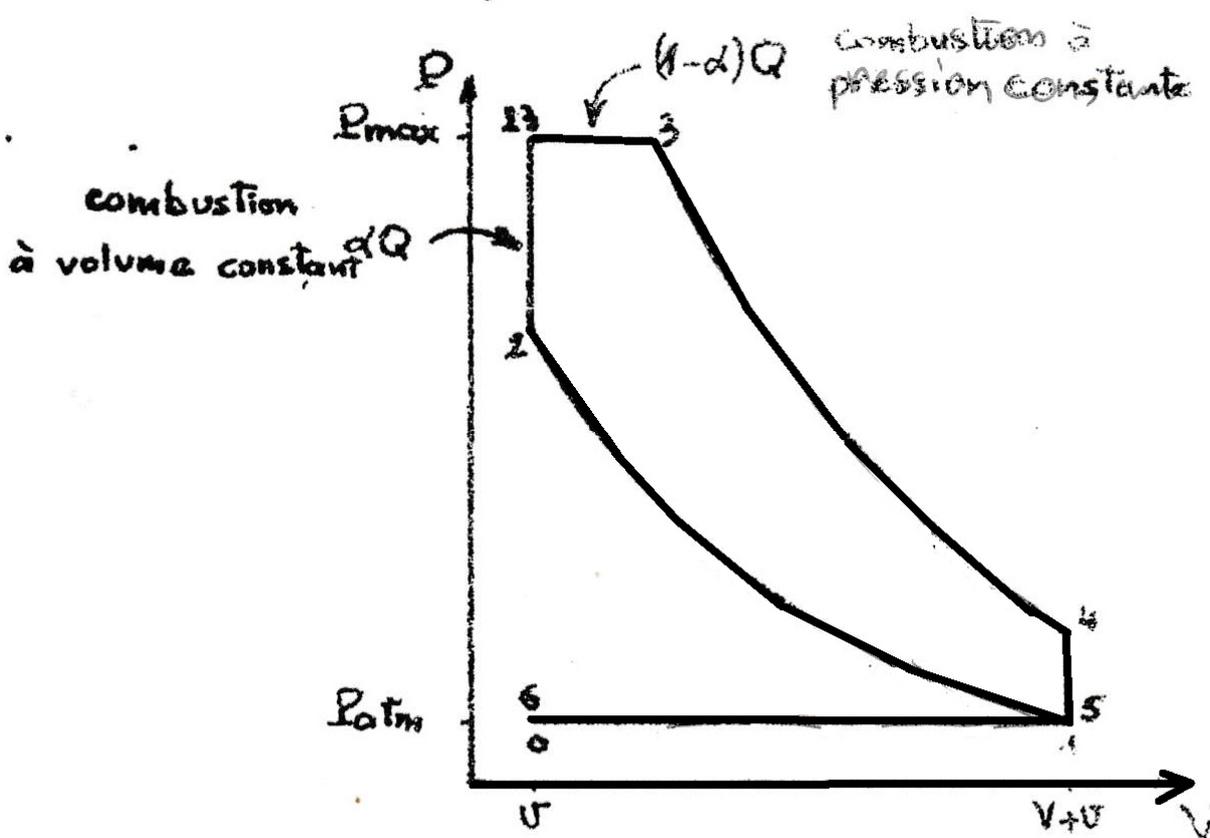


Figure II.3- Représentation du cycle théorique à 4 temps diesel semi rapide/rapide

### III- Cycle réel à quatre temps

#### 1- Diagramme pratique

Appliquons directement le cycle réel de Beau de Rochas sans changer les instants d'ouverture, de fermeture des soupapes et l'instant d'allumage.

Relevons à chaque instant le volume occupé par les gaz et leur pression. On peut alors reporter ces valeurs sur un diagramme P,V. On obtient ainsi le diagramme pratique.

Diagramme complet des cycles  
théorique et pratique d'un moteur 4T à  
allumage commandé

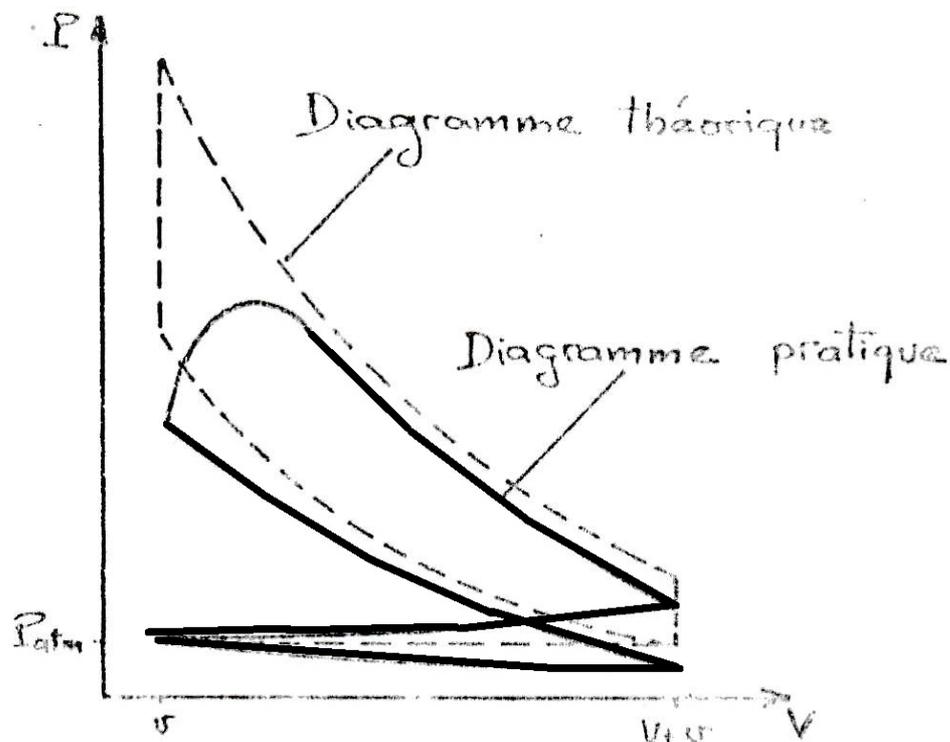


Figure II.4- Représentation du cycle théorique et pratique à 4 temps à allumage commandé

Si on compare le cycle théorique et pratique on constate que :

- Les pressions atteintes par la compression et la combustion dans le cycle pratique sont plus faibles que dans le cycle théorique. L'énergie récupérable sur le piston sera donc plus faible.
- L'admission se fait à une pression inférieure à la pression atmosphérique. La quantité de gaz frais admis sera donc inférieure à la quantité théorique.
- D'autre part, il faudra que le piston fournisse de l'énergie pour aspirer les gaz frais et refouler les gaz brûlés.

L'énergie fournie par le diagramme pratique sera donc beaucoup plus faible que celle calculée théoriquement.

## 2- Modification du cycle théorique – cycle Réel –

Pour obtenir un cycle réel fournissant plus d'énergie que le cycle pratique, il faudra modifier les instants d'ouverture, de fermeture des soupapes et l'instant d'allumage, pour tenir compte du comportement réel des gaz.

### Avance à allumage ou à l'injection

La combustion réelle n'est pas instantanée. Si on provoque l'étincelle quand le piston est au PMH la combustion aura lieu pendant la course descendante du piston et la pression maximale atteinte sera faible. On fait donc démarrer la combustion avant le PMH.

L'avance à allumage **AA**, exprime en degré de rotation du vilebrequin le temps écoulé entre l'étincelle et le PMH.

Dans le cas du moteur diesel, un autre facteur entre en ligne de compte, c'est que le gaz-oil ne s'enflamme pas sitôt qu'il est injecté dans le cylindre, mais au bout d'un certain temps appelé « **délai d'auto-inflammation** ». Il faudra tenir compte de ce délai pour introduire le gaz-oil avant le PMH, c'est l'avance à l'injection **AI**.

### Avance à l'ouverture d'admission AOA

On ouvre l'admission avant que la soupape d'échappement ne soit fermée. L'inertie des gaz brûlés qui partent vers l'échappement provoque l'aspiration des gaz frais par l'admission avant que le piston n'arrive au PMH. On crée ainsi un balayage des gaz brûlés résiduels qui occupe l'espace mort.

Sur les moteurs diesel ce balayage peut durer plus longtemps et être plus efficace. En effet, c'est l'air seul qui arrive à l'admission et il est moins grave de perdre de l'air par l'échappement que du mélange air-essence.

Dans les moteurs diesel, un autre facteur entre en ligne de compte, le gaz-oil ne s'enflamme pas aussitôt qu'il est injecté dans le cylindre, mais au bout d'un certain temps appelé « **délai d'auto-inflammation** » dont il faut tenir compte pour avancer l'injection **AI**.

### Retard à la fermeture d'admission RFA

Quand le piston arrive au PMB en fin d'admission, les gaz frais ont encore tendance à pénétrer dans le cylindre sous l'effet de leur inertie. On gagne donc dans le remplissage si on retarde la fermeture de la soupape d'admission (remplissage d'air-essence pour essence et d'air pour le diesel).

### Avance à l'ouverture d'échappement AOE

En ouvrant la soupape d'échappement avant que le piston n'arrive au PMB, on fait chuter rapidement la pression dans le cylindre. Ainsi, le piston rencontrera une plus faible contre-pression pendant le refoulement.

### Retard à la fermeture d'échappement RFE

Tout comme l'AOA, ce retard permet d'expulser plus complètement les gaz brûlés du cylindre et ainsi d'assurer un meilleur remplissage en gaz frais.

### 3- Epure de distribution

On représente ces décalages d'ouverture et de fermeture des soupapes sur une spirale figurant les deux tours du vilebrequin.

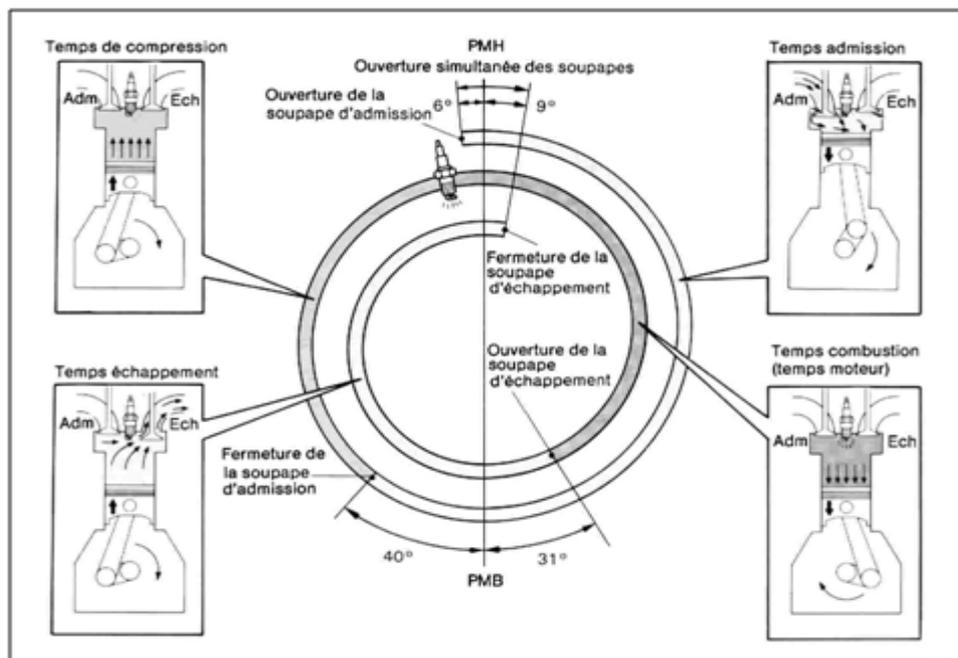


Figure II.5- Epure de distribution

#### 4- Diagramme du cycle réel mixte

Si dans un moteur dont on a réglé les avances à l'ouverture, les retard à la fermeture des soupapes et l'instant d'injection, on relève la pression des gaz en fonction du volume qu'ils occupent, on obtient le diagramme réel

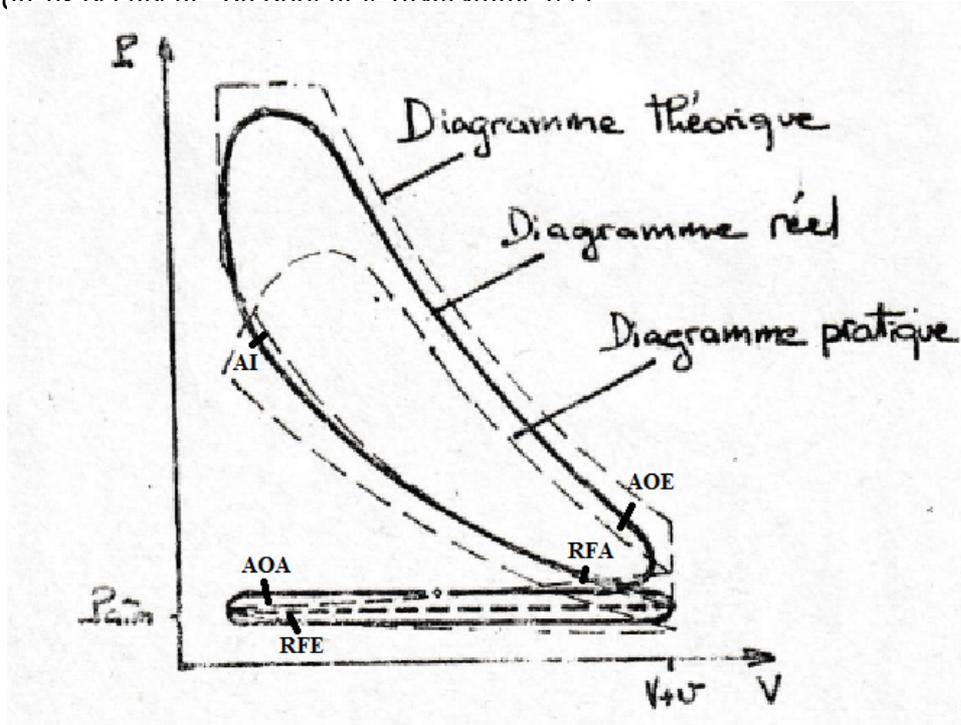


Figure II.6- Diagramme Théorique pratique et réel du cycle mixte

Par rapport au diagramme pratique, on constate pour le diagramme réel :

- Une pression d'admission plus forte.
- Une pression de refoulement plus faible.
- Une pression maximale beaucoup plus élevée.

Le travail moteur est donc plus important et le travail résistant plus faible. La quantité de combustible utilisé étant la même, le rendement du cycle réel est bien supérieur au rendement du cycle pratique.

#### 5- Ordre de grandeur d'un cycle théorique 4 T

Voici un exemple de cycle théorique quatre temps d'un moteur diesel fonctionnant le cycle mixte et dont le rapport volumétrique de compression  $\epsilon = 15$ .

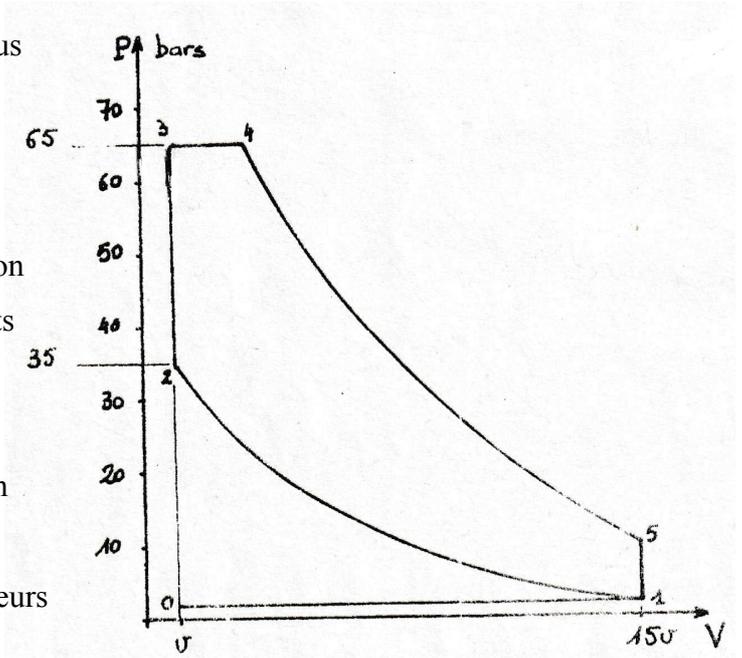
Températures théoriques :  $\theta_1 = 20^\circ \text{C}$ ,  $\theta_2 = 550^\circ \text{C}$ ,  $\theta_3 = 900^\circ \text{C}$ ,  $\theta_4 = 2100^\circ \text{C}$  et  $\theta_1 = 800^\circ \text{C}$

Les pression et températures réels sont plus faibles que les pression et températures théoriques.

La température  $\theta_2$  doit être suffisamment élevée pour provoquer l'auto-inflammation du gaz-oil. C'est pour cela que les rapports volumétriques sont plus élevés sur les moteurs diesel (14 à 24).

Pour les moteurs à essence au contraire on cherche à éviter l'auto-inflammation. Les rapports volumétriques seront donc inférieurs à 9. La température  $\theta_2$  atteinte en fin de

compression sera donc plus faible, mais les températures maximales seront du même ordre de grandeur.



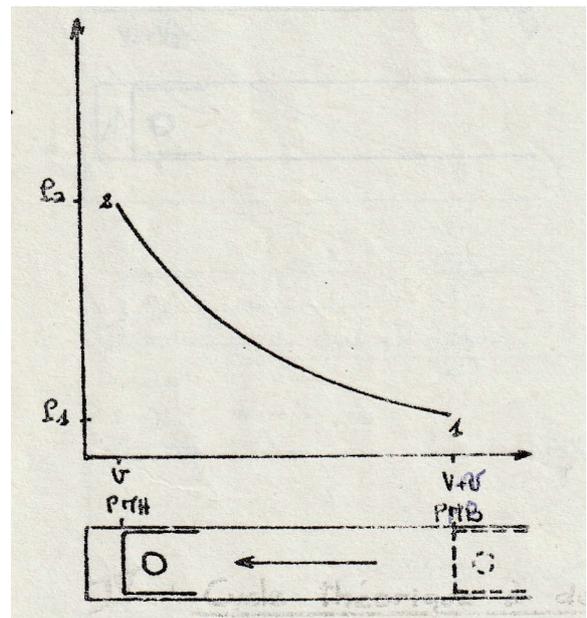
**IV- Cycle théorique du moteur à deux temps**

Les hypothèses sur la circulation des gaz restent les mêmes que celles pour le moteur à quatre temps.

**1- Diagramme du cycle pour moteur à allumage commandé**

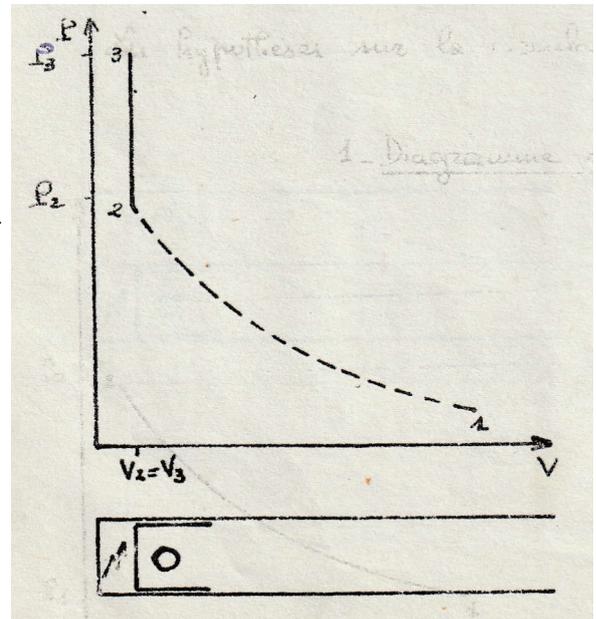
1<sup>er</sup> Temps : Compression

- Le piston est au PMB, le cylindre est rempli par les gaz frais.
- Le piston remonte du PMB au PMH en comprimant adiabatiquement les gaz frais.



### Allumage

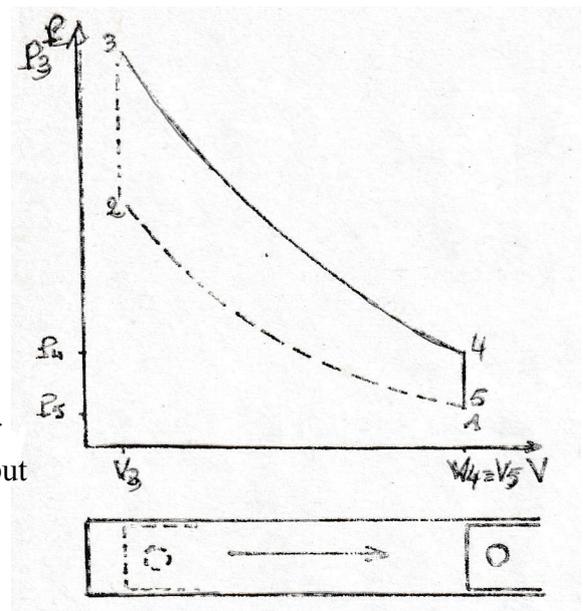
La combustion des gaz frais se fait instantanément  
Avec augmentation de pression à volume constant.



### 2<sup>ème</sup> Temps : Détente

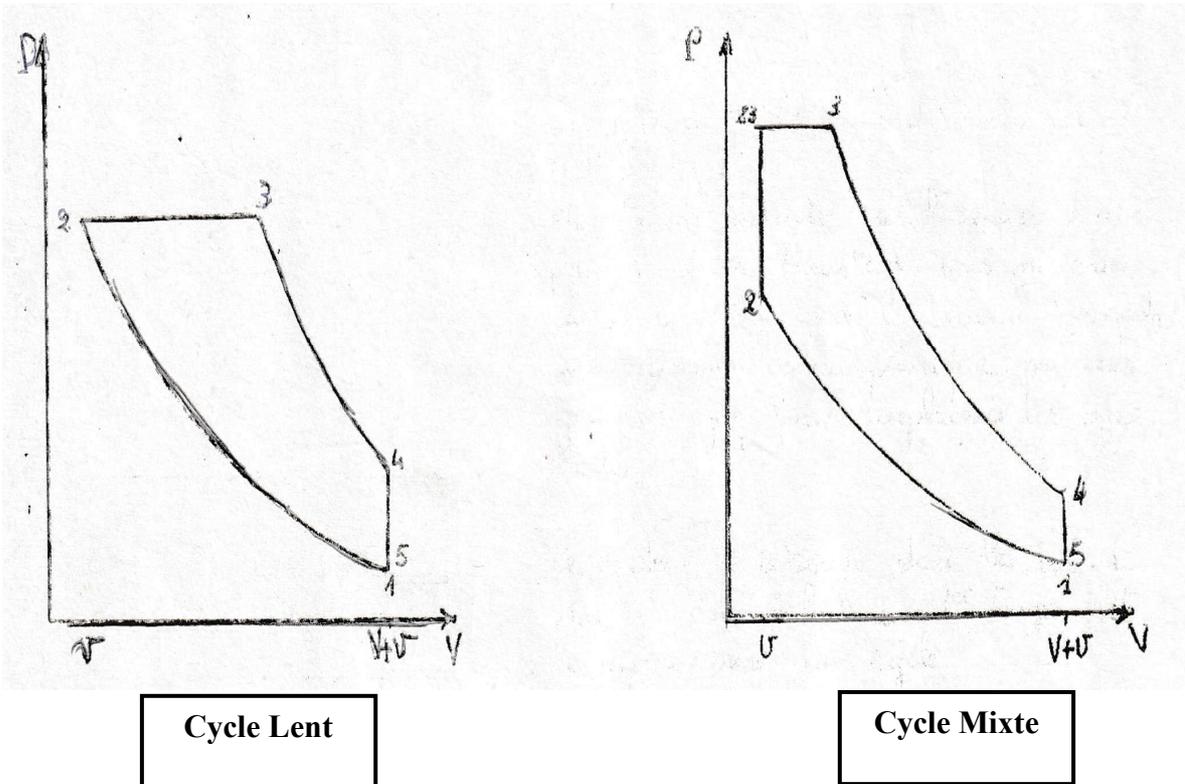
- Le piston est repoussé par les gaz brûlés du PMH au PMB. La détente est adiabatique.
- En fin de détente les lumières d'échappement et de transfert sont ouvertes. La pression devient brusquement égale à la pression atmosphérique pendant que les gaz frais remplacent les gaz brûlés.

Le moteur se retrouve dans le même état qu'au début du premier temps.



## 2- Diagramme du cycles pour moteur à allumage par compression

Tout comme pour le cycle à 4 temps, il diffère du précédent que par la période de combustion.



### V- Cycle réel à deux temps

Le cycle réel doit tenir compte du fait que :

- Les lumières sont découvertes avant que le piston n'arrive au PMB. C'est la dimension de ces lumières qui déterminera l'avance à l'ouverture et le retard à la fermeture des orifices d'échappement de transfert.

Les lumières d'échappement doivent être découvertes légèrement avant celles de transfert. Sinon les gaz brûlés sous pression s'échapperaient vers le carter. Elles seront donc plus hautes que les lumières de transfert.

- Dans le cas des moteurs à soupapes d'échappement, on donne une avance à l'ouverture et un retard à la fermeture.

- La combustion débute avant le PMH (avance à l'allumage ou à l'injection) et n'est pas instantanée.

Le cycle réel aura donc une allure différente de celle du cycle théorique.

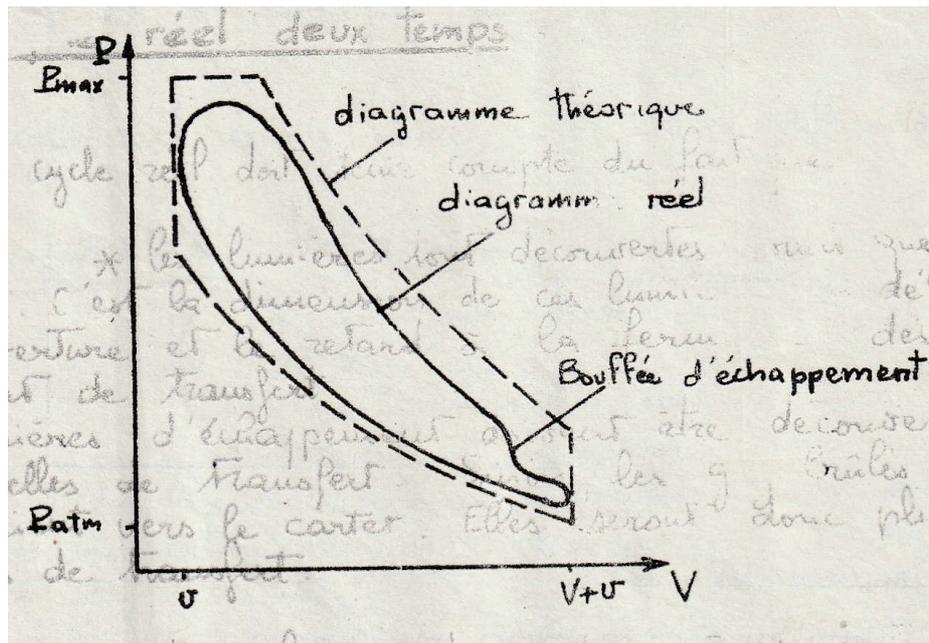


Figure II.7- Représentation des cycles théorique et réel moteur à 2 temps

## VI- Domaine d'utilisation des moteurs

### 1- Moteur à deux temps

Les moteurs à deux temps ont des avantages spécifiques qui leurs réservent des plusieurs domaines d'utilisation.

➤ Pour une même cylindrée et une même vitesse de rotation, le moteur à deux temps développe une puissance deux fois plus grande que celle d'un moteur à quatre temps.

Pour une même puissance développée, le moteur à deux temps est plus léger qu'un moteur à quatre temps.

➤ Le moteur à 2T est plus simple mécaniquement qu'un moteur à 4T.

On pourra donc les utiliser :

#### a/ Pour les moteurs à essence de faible cylindrée

➤ Quand on recherche la légèreté

**Exemple :** Les cyclomoteurs peuvent développer jusqu'à 5ch pour un moteur de faible encombrement.

Quand on recherche les fortes puissances et accélérations.

**Exemple :** Les motocyclettes jusqu'à 750cm<sup>3</sup>, construites en série peuvent développer 75ch à 6000tr/mn.

➤ Quand on recherche la simplicité de construction.

**Exemple :** Les moteurs de modèle réduit doivent comporter le minimum de pièces en mouvements.

**b/ Pour les moteurs diesel de moyenne et forte puissance semi-rapide et lent.**

➤ Dans les moteurs marins on cherche à obtenir des puissances importantes pour un faible encombrement. On choisira alors le moteur à 2T.

➤ Les moteurs de très grosse cylindrée mettant en mouvement des masses importantes ne peuvent tourner que très lentement. La vitesse de rotation ainsi fixée, le moteur à 2T fournira une puissance bien supérieure au moteur à 4T.

**Exemple :** Moteur Sulzer à 12 cylindres, course du piston 1800 mm, vitesse de rotation 108 tr/mn, la puissance 48000ch.

**2- Les moteurs à quatre temps**

En fait les moteurs à deux temps n'ont pas à cylindrée égale la puissance double du moteur à quatre temps car :

➤ Le moteur à deux temps est limité en vitesse de rotation par l'écoulement des gaz. Si on tourne trop vite l'admission et l'échappement ne se feront pas correctement. A cylindrée égale on fera généralement tourner plus vite le moteur à 4T.

➤ Le rendement du cycle à 2T est inférieur à celui du 4T.

➤ Le moteur à 4T présente moins de problème de graissage que le moteur à 2T.

➤ Le moteur à 4T présente un frein moteur qui est un élément de sécurité sur les véhicules automobiles.

**a- Les moteurs à essence**

Sur les motocyclettes, ils concurrencent les 2T à partir de 350 cm<sup>3</sup>. Ils présentent en outre une plus grande souplesse (meilleur couple à bas régime) et sont plus silencieux.

Ils équipent presque la totalité des véhicules automobiles.

**b- Les moteurs diesel**

Ils constituent une part de plus en plus importante du parc automobile. Les progrès techniques permettent de réaliser des moteurs diesel rapides de faible cylindrée pouvant équiper de petites automobiles.

On utilise également les moteurs diesel pour la propulsion de bateaux et pour l'entraînement d'alternateur.

## Organes fixes du moteur

### A/ Le Bâti

#### I- Rôle du Bâti

#### II- Solutions adoptées

##### 1- Matériaux

##### 2- Formes données au bâti

##### 3- Fixation du vilebrequin

#### III- Finition du bâti

### B/ Le Cylindre

#### I- Fonction

#### II- Cylindres usinés dans le bloc

#### III- Chemises sèches

#### IV- Chemises humides

#### V- Entretien des chemises

##### 1- Cylindres neufs

##### 2- Problèmes d'utilisation

### C/ La Culasse

#### I- Fonction

#### II- Réalisation de l'étanchéité

##### 1- Rigidité des pièces assemblées

##### 2- Serrage du joint

##### 3- Comportement du joint

**III- Résistance à la pression des gaz**

**IV- Position des organes de distribution sur la culasse**

**1- Soupapes**

**2- Rampe de culbuteurs**

**3- Passage des gaz**

**V- Influence de la culasse sur la combustion**

**1- Moteur à essence**

**2- Moteur diesel**

**VI- Refroidissement de la culasse**

**1- Refroidissement par eau**

**2- Refroidissement par air**

**VII- Défauts et usures de la culasse**

**1- Défauts d'étanchéité**

**2- Défauts de refroidissement**

**3- Dépôts de calamine**

## A/ Le Bâti

### I- Rôle du bâti

Il constitue la carcasse du moteur. Il supporte l'ensemble des organes mobiles, la culasse et les circuits.

Pour assurer le guidage des pièces mobiles, il devra résister sans se déformer aux contraintes qui lui sont imposées.

#### 1- Contraintes mécaniques

- Poids.
- Vibration du vilebrequin.
- La pression des gaz de combustion.

#### 2- Contraintes d'origine thermique

Certaines parties du bâti sont chauffées fortement par les gaz de combustion. La rigidité du bâti est essentielle car les pièces mobiles sont assemblées avec des jeux de l'ordre du centième de millimètre. La résistance à la fatigue est aussi importante, et dépend de la qualité du matériau utilisé. Enfin une bonne conductibilité thermique favorisera les échanges calorifiques et diminuera les températures maximales atteintes.

### II- Solutions adoptées

#### 1- Matériau

##### a/ Coulée de fonte perlitique, aciéré ou non

C'est la solution la plus couramment utilisée. La fonte additionnée au silicium se coule facilement Elle conduit à des bâtis rigides.

##### b/ Carter monobloc

Dans la plus part des cas, les bâtis constituent un carter qui supporte à la fois le vilebrequin et tous les cylindres. C'est ce que l'on appelle bâti monobloc ou bloc cylindrés. Il présente l'avantage d'une bonne rigidité et d'une bonne transmission de la chaleur. Cependant pour les moteurs refroidis par air en particulier, on peut concevoir le bâti comme une structure rigide enveloppant le vilebrequin et sur lequel sont fixés les cylindres à l'aide de tirants.

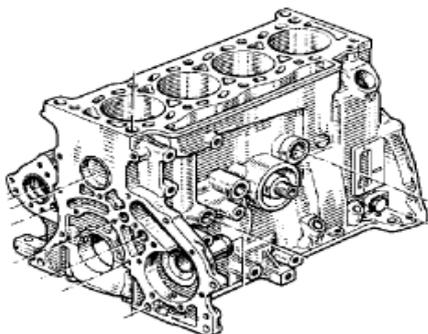


Figure III.1- Représentation du bâti

## 2- Disposition des cylindres

### ➤ Moteurs en ligne

C'est la disposition la plus simple. Elle est utilisée sur les moteurs de faible et moyenne puissance (600 ch), ainsi que sur les très gros moteurs jusqu'à 40000ch. Elle peut être longitudinale ou transversale.

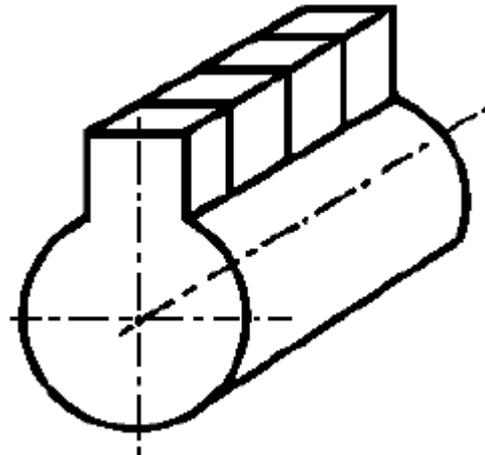


Figure III.2- Disposition des cylindres en lignes

### ➤ Moteurs en V

Ils sont souvent utilisés pour les moteurs d'automobiles de 6 ou 8 cylindres et pour les moteurs diesel de moyenne et grande puissance de 8, 12 et 16 cylindres. Ils permettent :

- ❖ Un encombrement plus faible pour un nombre de cylindre donné.
- ❖ Un couple moteur plus régulier.

Pour des raisons de régularité de l'allumage donc du couple, on est amené à choisir un angle de V comme suit :

Nombre de cylindre	Moteur 4T	Moteur 2T
6	120°	60°
8	90°	45°
12	60°	30°
16	45°	

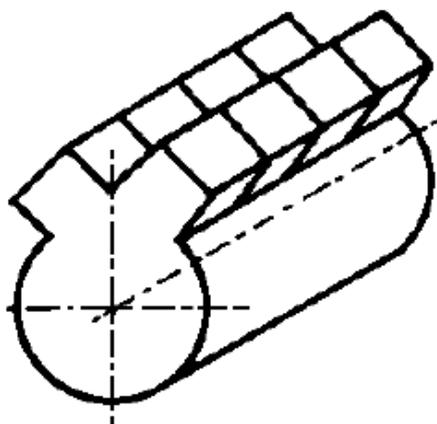
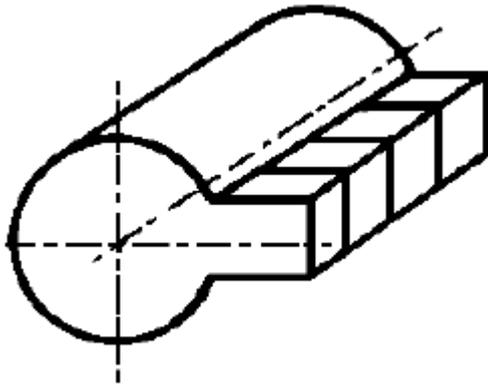


Figure III.3- Disposition des cylindres en V

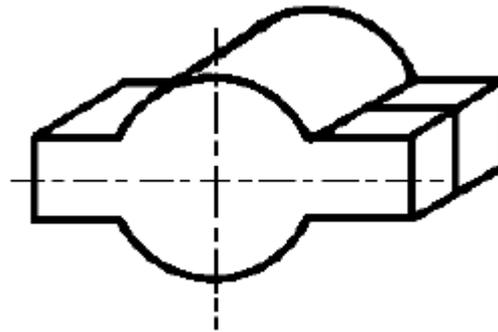
### ➤ Moteur à plat

Les cylindres pour les moteurs à plat, peuvent être en ligne ou opposés. C'est souvent des questions d'encombrement qui imposent d'utiliser les moteurs à plat.

**Exemple :** Moteur de chars, motocyclettes ou d'automobiles.



Moteur à plat en ligne



Moteur à plat en opposition

Figure III.4- Disposition des cylindres en lignes à plats et en lignes

### 3- Fixation du vilebrequin

Figure III.2- Disposition des cylindres en lignes

Les paliers dans lesquels tourne le vilebrequin sont composés de deux demi paliers. L'un fait parti du bâti, le second (chapeau de palier) est fixé au bâti par des goujons après positionnement du vilebrequin.

**a)-** Si le demi-palier supérieur fait parti du bâti, le vilebrequin est suspendu. Les efforts qui s'exercent sur le vilebrequin sont transmit essentiellement aux chapeaux de paliers et aux goujons qui devront avoir une forte section.

**b)-** Si le vilebrequin repose sur le demi-palier palier inférieur solidaire d'une plaque de base, les goujons subiront moins d'efforts mais la construction est plus lourde et plus encombrante.

### III- Finition du bâti

Après moulage ou assemblage, on devra usiner les parties qui jouent un rôle dans le fonctionnement du moteur ou assemblage du carter ou des éléments annexes.

#### 1)- La ligne d'arbre

C'est l'ensemble des paliers qui devront supporter le vilebrequin. Ils devront être parfaitement alignés.

#### 2)- La ligne d'arbre à cames

C'est aussi une série de paliers qui devra supporter l'arbre de commande des soupapes.

### 3)- Les cylindres

S'ils sont usinés directement dans le bloc ou sinon les portées pour le positionnement des chemises.

### 4)- La surface d'appui de la culasse

C'est le plan de joint qui devra assurer l'étanchéité des cylindres.

### 5)- La surface d'appui du carter

C'est le plan de joint qui devra assurer l'étanchéité à l'huile de lubrification.

## B/ Le Cylindre

### I- Fonction

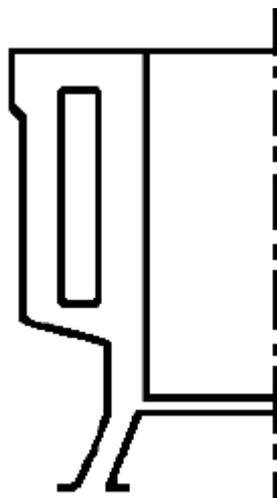
Il délimite le volume dans lequel se produit la combustion des gaz et la transformation de leur énergie en énergie mécanique.

Le cylindre devra donc :

- Guider le piston en translation en assurant une bonne étanchéité au gaz et un faible coefficient de frottement.
- Résister à la pression des gaz de combustion.
- Permettre une bonne évacuation de la chaleur.

### II- Cylindre usiné dans le bloc

Quand le bâti est un bloc-cylindres en fonte, il est possible d'usiner directement les cylindres dans ce bâti. En effet la fonte présente un bon coefficient de frottement avec l'acier ou l'alliage léger du piston. De plus la structure de la fonte permet à l'huile de lubrification de bien adhérer à sa surface.



Chemise sèche

L'usinage de ces cylindres est facile et rapide. Dans le cas d'un moteur à refroidissement par air, l'évacuation des calories vers les allaites se fait sans intermédiaire. Cette technique est encore couramment utilisée sur les petits moteurs refroidis par air, surtout quand le cylindre est assemblé par des tirants.

Cependant de nombreux inconvénients jouent en sa défaveur pour les moteurs plus gros.

➤ La fonte des cylindres doit avoir une structure bien particulière (fonte à plage de ferrite dispersée), avec addition de phosphore, Cr, Mo, .... Si ou aléser des carneaux dans la partie supérieure de la chemise (cette solution ne peut être réalisé que sur les gros moteurs dont l'épaisseur de la chemise est suffisante).

Une bonne réfrigération des cylindres est primordiale et a conduit à généraliser l'emploi de chemises humides.

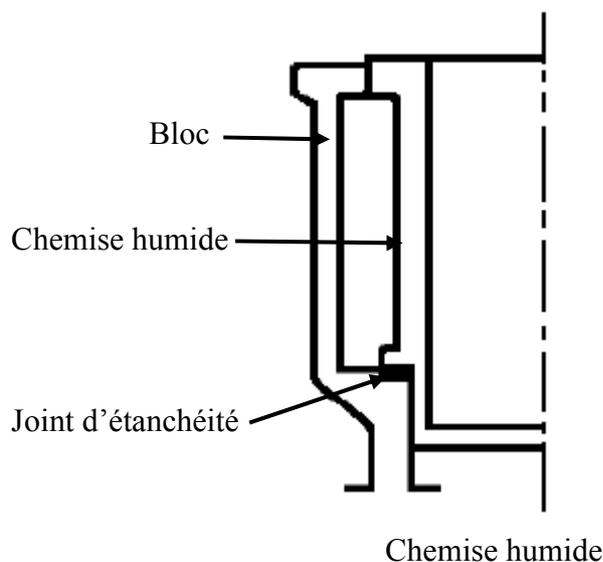
Au dessus d'une température de surface de 150°C, l'huile de lubrification en contacte avec la chemise voit sa viscosité et ces propriétés de lubrification diminuer.

Outre les avantages des chemises sèches, les chemises humides sont facilement interchangeables.

Sur le plan des inconvénients, l'étanchéité du circuit de refroidissement peut poser des problèmes.

On le réalise:

➤ A la base de la chemise par un joint d'étanchéité.  
 ➤ Au niveau du plan de joint supérieur en serrant la chemise sur le bloc par l'intermédiaire de la culasse. Ceci nécessite un usinage très précis de la partie supérieure de la chemise.

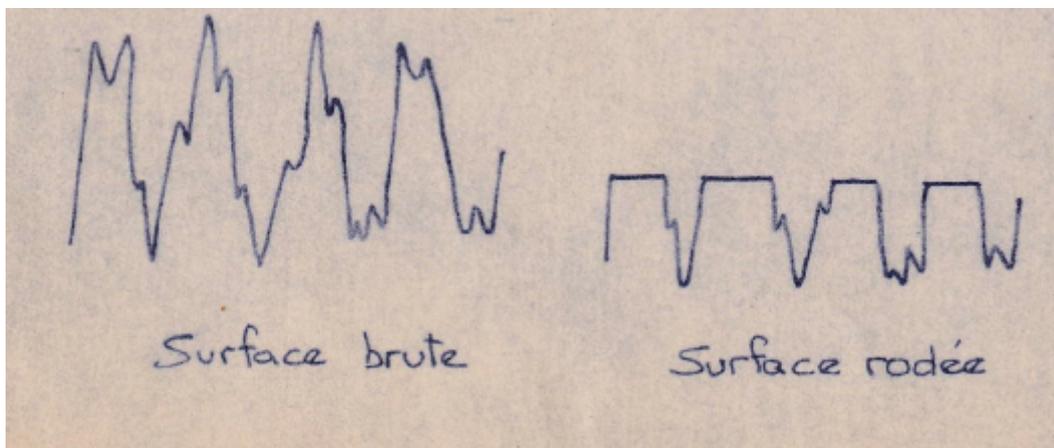


### III- Entretien des chemises

#### 1- Cylindres neufs

La finition de la surface intérieure du cylindre se fait par pierrage. Ce procédé donne comme état de surface de fines structures croisées. Pendant la période de rodage, ces structures se comportent comme de petits réservoirs d'huile et améliorent la lubrification. Pendant les premières heures de fonctionnement la surface est polie par le piston et surtout les segments

Si le rodage est fait correctement, c'est-à-dire à vitesse modéré au départ puis une montée progressive en régime, les pics de rugosité doivent être écrasés sans qu'il y ait arrachement de métal.



#### 2- Problèmes d'utilisation

##### a) Déformation en cours d'utilisation

Les chemises sont soumises à l'action des gaz de combustion à haute température. Les températures varient d'un point à l'autre de la chemise. Les différences de dilatation peuvent se traduire par des déformations qui entraînent :

- Des défauts de lubrification.
- Des passages des gaz brûlés dans le carter.

##### b) Ovalisation des chemises

C'est l'usure la plus courante des cylindres. Le piston poussé par les gaz brûlés ou par la bielle s'appuie toujours sur la même partie de la chemise. Il provoque l'usure de cette partie. Le cylindre devient alors ovale. A partir d'un certain degré d'ovalisation (vérifié au comparateur) il faut changer la chemise ou réalésier le bloc.

### c) Rayures

Si des particules pénètrent dans le cylindre (sable, particules métalliques, ...), elles occasionnent des rayures longitudinales sur la chemise. Si ces rayures sont importantes, elles peuvent faciliter le passage des gaz brûlés entre chemise et piston, ce qui entraîne une pollution de l'huile de graissage et des dépôts de carbone dans les gorges de segments.

On peut voir les rayures et estimer leur profondeur à l'aide d'un endoscope qu'on introduit dans le cylindre par les puits d'injection ou des bougies.

Une cassure de segment raye la chemise suivant deux sillons parallèles caractéristiques. Le remplacement du segment et souvent de la chemise est obligatoire.

### d) Entartrage

La surface extérieure de la chemise est en contact avec l'eau de refroidissement à haute température. Le calcaire peut s'y déposer, formant une couche isolante qui ralentit le transfert de chaleur. Il faut donc procéder à un détartrage.

## C/ La culasse

### I- Fonction

La culasse est une pièce en fonte, acier ou en alliage léger, venant de fonderie et dont les parties fonctionnelles ont été usinées. La culasse est fixée sur le bloc par des goujons.

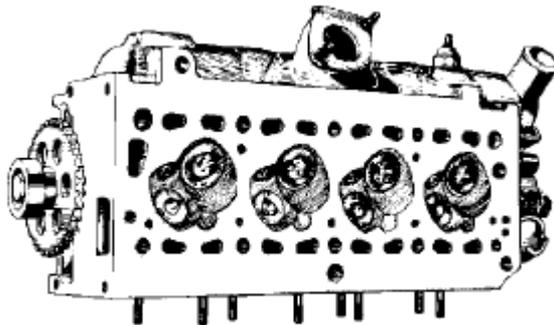


Figure III.5- Représentation de la culasse

Son rôle est :

- D'assurer l'étanchéité du cylindre

Elle constitue la partie supérieure du cylindre et devra supporter la pression des gaz de combustion.

- Supporter éventuellement les organes de distribution, soupapes, ressorts, rampe de culbuteur s'appuient sur la culasse. Les gaz d'admissions et d'échappements passent à travers la culasse (moteur 4T).

➤ Contenir la bougie d'allumage, ou l'injecteur, par sa forme améliorer la combustion. Préchambre de combustion intégrée à la culasse, forme du fond de culasse pour assurer une bonne turbulence.

➤ Parfois de contenir le système de décompression de distribution d'air de démarrage, une soupape d'alimentation en gaz naturel, etc....

## II-Réalisation de l'étanchéité

### 1- Rigidité des pièces assemblées

La culasse et bloc- cylindres seront usinés parfaitement plans sur la surface de contact. Leur assemblage et serrage doit assurer l'étanchéité des cylindres. Il faut que les surfaces ne se déforment pas, donc une bonne rigidité de la culasse et il faut interposer un joint malléable résistant aux hautes températures. On utilisera parfois une feuille d'acier doux, mais le plus souvent un joint métalloplastique ou en cuivre recuit.

### 2- Serrage du joint

Le serrage correct de ce joint est important. Il faut que les deux surfaces (bloc-culasse) l'écrasent bien régulièrement. On aura donc intérêt à avoir le plus de goujons possible.

Pour éviter une déformation de la culasse il faut :

a) Que l'ordre de serrage des goujons soit bien respecté. On commence par serrer les goujons du centre pour aller vers l'extérieur.

**Exemple :**

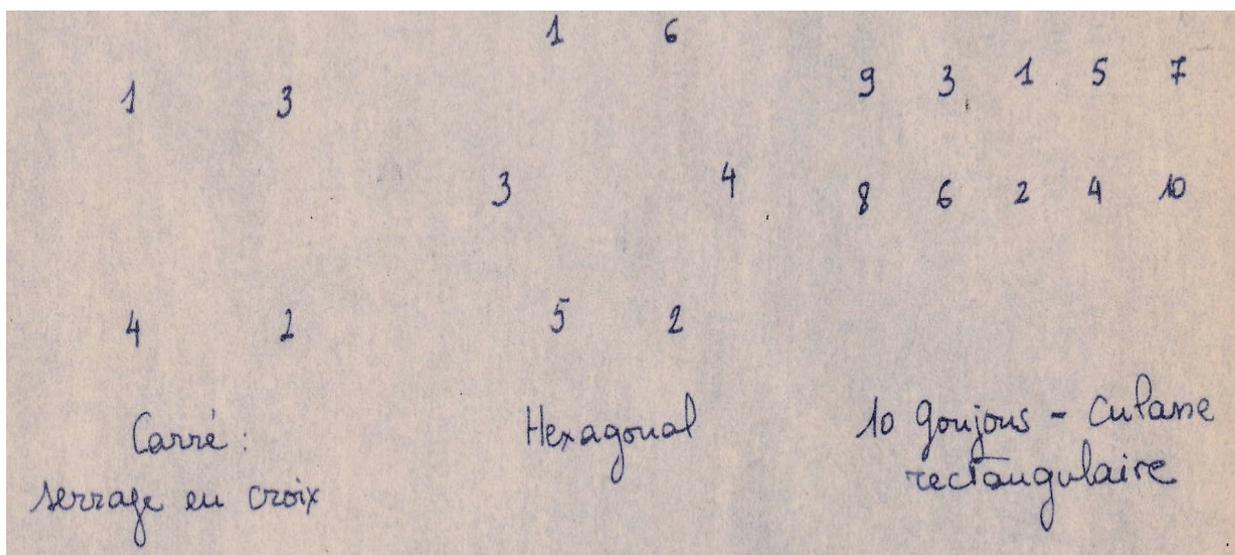


Figure III.6- Représentation du serrage de la culasse

Pour un moteur donné, le serrage des goujons est donné par le constructeur. On peut obtenir le serrage désiré par :

- Mesure de l'allongement des goujons. C'est la méthode la plus précise, mais elle est longue et nécessite un appareillage compliqué.
- Contrôle de l'angle de rotation de l'écrou de serrage. La méthode est assez précise, mais la position de départ de l'écrou est difficile à déterminer.
- Mesure du couple de serrage des écrous à l'aide d'une clé limiteur de couple ou clé dynamométrique. Cette façon est la plus commode et la plus employée. Il faut cependant s'assurer avant le serrage que les goujons sont bien graissés pour ne pas ajouter un couple de frottement important au couple de serrage mesuré.
- Dans tous les cas, le serrage doit être progressif. On serrera la culasse dans l'ordre imposé à des valeurs croissantes.

### **3- Comportement du joint**

Lors du serrage, le joint malléable va se former aux micro-irrégularités de la surface de la culasse et du bloc. Pour permettre au joint de se déplacer pendant son écrasement, il faudra le graisser légèrement avant montage. Si la culasse est un peu rayée, on peut enduire la surface d'une pellicule de pâte à joint. Des rayures importantes ne sont pas rattrapables et nécessitent une rectification de la surface.

Au bout de quelques temps d'utilisation (1000 km ou 100 à 150 heures), le joint se tasse sous l'effet des vibrations et il faut reprendre le serrage de la culasse.

### **III- Résistance à la pression des gaz**

La paroi inférieure de la culasse ou fond de culasse subit la pression des gaz de combustion.

$D$  étant l'alésage du cylindre, l'épaisseur du fond de culasse est de l'ordre de  $0.1 D$ .

Si l'épaisseur est trop faible, la résistance sera insuffisante.

Si l'épaisseur est trop forte, le refroidissement par l'eau ne sera pas assez efficace.

Pour éliminer certains points chauds, on est amené à diminuer localement l'épaisseur de la paroi.

### **IV- Position des organes de distribution sur la culasse**

#### **1- Les soupapes**

Si la culasse est en fonte, on peut usiner directement le guide de soupape et le siège de soupape sur la culasse. Mais pour des questions de qualité de fonte et de traitement des sièges, on préfère les rapporter.

## 2- Rampe de culbuteurs

Les culbuteurs qui commandent les soupapes, sont articulés sur un ou plusieurs axes fixes sur la culasse. Le graissage des culbuteurs se faisant le plus souvent par l'axe, il faut prévoir à travers la culasse une canalisation d'huile venant du carter.

## 3- Passage des gaz

Les gaz frais d'un moteur à 4T doivent passer au travers de la culasse, venant des tubulures, pour aboutir au dessus de la soupape dans la chapelle d'admission. Les gaz brûlés suivent un trajet inverse.

La dimension des conduits, doit être telle que la vitesse des gaz à l'admission soit de 40 m/s et à l'échappement de 45 m/s, avec un maximum au passage des soupapes de 60 m/s à l'admission et de 80 m/s à l'échappement.

La forme de la chapelle d'admission doit permettre le tourbillonnement des gaz. Dans le moteur à essence l'homogénéité du mélange dépend de la turbulence. Dans le moteur diesel, la turbulence de l'air permet de fractionner les gouttelettes. Dans les deux cas, la vitesse de combustion est accrue ce qui est essentiel pour pouvoir augmenter la vitesse de rotation des moteurs.

Les cavités de passages des gaz, viennent généralement brutes de fonderie. Pour les moteurs de hautes performances, le polissage des conduits améliore considérablement l'écoulement des gaz donc la pression de remplissage.

## V-Influence de la culasse sur la combustion

### 1- Moteur diesel

La culasse contient l'injecteur. Dans de nombreux moteurs rapides, la chambre de combustion est incluse dans la culasse. Le piston arrive alors presque au ras du plan de joint.

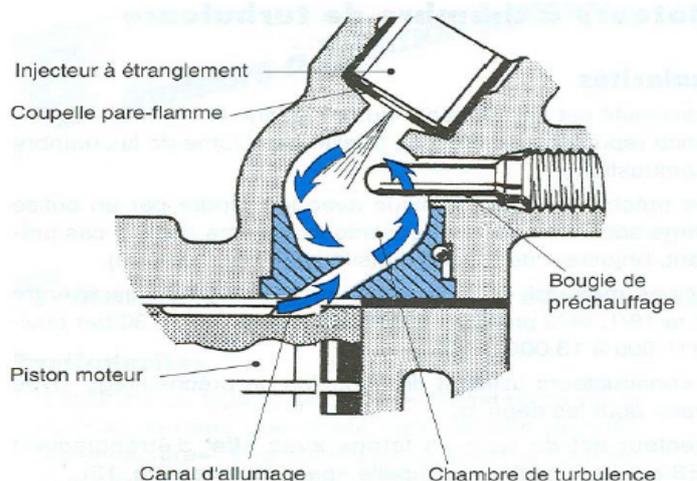


Figure III.7- Représentation de la chambre de combustion

L'air comprimé pénètre par un canal dans la chambre de combustion dont la forme favorise la combustion. Le gaz-oil est alors injecté, commence à brûler dans la chambre et la combustion se poursuit dans le cylindre pendant la descente du piston.

On peut par ce procédé, atteindre des vitesses de rotation importantes, ce qui permet d'utiliser des moteurs diesel pour l'automobile. Cependant, à bas régime, le couple sera faible car la turbulence est moins bonne.

## **2- Moteur à essence**

La culasse contient le trou de bougie. Son fond a généralement une forme hémisphérique. Les électrodes de la bougie seront positionnées en un endroit où la turbulence est forte.

## **VI- Refroidissement de la culasse**

### **1- Refroidissement par eau**

La grande majorité des moteurs est refroidie par eau. L'eau passe ensuite dans un radiateur qui évacue les calories vers l'air ambiant.

L'eau arrive du bloc à travers le joint de culasse. Elle doit pénétrer dans la culasse par un point bas pour permettre la vidange et ressortir par un point haut pour éliminer les bulles d'air ou les poches de vapeur pouvant se former au contact des points chauds.

La réfrigération doit être soignée, surtout autour de l'injecteur ou de la soupape d'échappement.

### **2- Refroidissement par air**

La culasse doit être abondamment pourvue d'ailettes.

## **VII- Défauts et usure de la culasse**

### **1- Défauts d'étanchéités**

Ils peuvent être dus à :

- Mauvais serrage de la culasse.
- Déformation du plan de joint ou des rayures.
- Détérioration du joint (fissures) porté à haute température.

Ils se traduisent par :

- Un défaut de compression, le moteur ne développe pas sa puissance.
- Un passage des gaz brûlés dans l'eau de refroidissement, ce qui porte cette eau à des températures anormales, ce qui entraîne d'autres détériorations dans le moteur.

Il faut :

- Changer le joint de culasse.

➤ Rectifier les surfaces du plan de joint, dans la limite des cotes de réparations imposées.

## **2- Défauts de refroidissement**

Ils peuvent être dus à :

- Défaut d'étanchéité du joint de culasse.
- Un entartrage du moteur. Le dépôt de calcaire à l'extérieur des chemises ou dans la culasse, diminue l'échange thermique eau-métal.
- Un entartrage du circuit d'eau. La diminution de section des conduits limite le débit d'eau. D'autre part le refroidissement de l'eau dans le radiateur est perturbé.
- La formation de poches de vapeur, dues à un point chaud dans la culasse. Une partie des cavités de la culasse n'est plus en contact avec l'eau de refroidissement.

Ils se traduisent par :

- Un joint de culasse grillé, s'il ne l'a été pas.
- Un problème de lubrification, la viscosité de l'huile diminue avec la température.
- Une décomposition de l'huile pouvant gommer les segments ou les soupapes.
- Une auto-inflammation dans les moteurs à essence. La combustion se déclenche spontanément et les fortes pressions atteintes brusquement font cogner le moteur. Le vilebrequin peut être endommagé par les contraintes qui lui sont imposées.

Il faut :

- Refaire l'étanchéité.
- Détartrer le moteur et le circuit.
- Eliminer les dépôts de calamine pouvant constituer un point chaud.

## **3- Dépôts de calamine**

Ce sont des dépôts durs formés à haute température par la combustion sur une surface métallique de gouttelettes de combustible ou d'huile. Ces dépôts sont isolants. Comme ils n'évacuent pas la chaleur leur température est très élevée. Ils peuvent constituer un point chaud sur lequel l'essence peut s'enflammer spontanément, créant de l'auto-allumage.

Une fine couche de calamine n'est pas un inconvénient pour la marche du moteur. Ce sont les masses localisées qui peuvent être dangereuses.

Il faut :

- Les gratter
- Vérifier le refroidissement du moteur.
- Contrôler l'injection ou la carburation (si la combustion est mauvaise).
- Eliminer les éventuelles remontées d'huile du moteur.

## Organes mobiles du moteur

### A/ Le Piston

#### **I- Fonction-Description**

#### **II- Problèmes mécaniques**

- 1- Transmission des efforts**
- 2- Guidage**
- 3- Basculement du piston**
- 4- Inertie du piston**
- 5- Matage des gorges de segments**

#### **III- Problèmes thermiques**

- 1- Dilatation**
- 2- Résistance aux contraintes thermiques**
- 3- Auto-allumage**
- 4- Refroidissement des pistons**

#### **IV- Étanchéité – Segmentation**

- 1- Principe**
- 2- Segments d'étanchéités**
- 3- Segments racleurs**

#### **V- Formes du piston liées aux problèmes de combustion**

- 1- Moteur à allumage commandé (essence)**
- 2- Moteur à allumage par compression**

#### **VI- Lubrification du mouvement**

- 1- Moyen de graissage**
- 2- Comportement du film d'huile**
- 3- Adhérence de l'huile**

## **B/ La Bielle**

### **I- Généralités**

- 1- Fonction – Contraintes**
- 2- Description**
- 3- Fabrication**

### **II- Pied de bielle**

- 1- Axe fixe**
- 2- Axe mobile**

### **III- Corps de bielle**

### **IV- Tête de bielle**

- 1- Montage**
- 2- Bielles pour moteur en V**

### **V- Coussinets**

- 1- Lubrification d'un mouvement de rotation**
- 2- Matériaux utilisés**
- 3- Formes du coussinet**
- 4- Défauts de fonctionnement**

## **C/ Vilebrequin**

### **I- Fonction – Description**

### **II- Contraintes appliquées**

- 1- Contraintes alternées**
- 2- Vibrations**
- 3- Amortisseurs de vibrations**

### **III- Technologie**

- 1- Construction**
- 2- Matériaux utilisés**

**3- Finitions**

**IV- Lubrification**

**1- Vilebrequin non-évidé**

**2- Vilebrequin évidé**

**V- Etanchéité en bout d'arbre**

**VI- Accessoires liés au vilebrequin**

**1- Le volant moteur**

**2- Poulies et couronnes**

## A/ Le Piston

### I- Fonction – Description

Le piston constitue la face mobile de la chambre de combustion. Il coulisse dans le cylindre. Son mouvement alternatif détermine les temps du cycle.

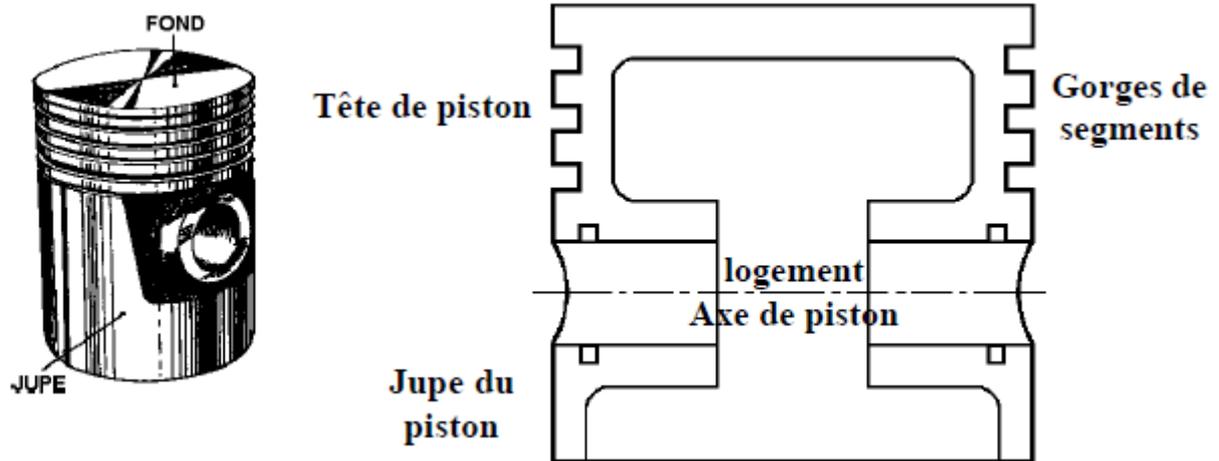


Figure IV.1- Représentation du piston

❖ Il assure simultanément plusieurs fonctions :

- 1) Transformation des efforts de pression créée par les gaz brûlés sur la tête du piston et transmis à la bielle par l'intermédiaire de l'axe du piston.
- 2) L'étanchéité de la chambre de combustion à la sortie des gaz brûlés et à l'entrée de l'huile. Le profil du piston et les segments logés dans les gorges devront assurer cette étanchéité.
- 3) Création dans certains moteurs de la turbulence des gaz, nécessaires à la bonne combustion.

❖ Pour remplir ces fonctions, le piston devra :

- 1) Être correctement guidé dans le cylindre, ce qui est principalement le rôle de la jupe.
- 2) Résister mécaniquement aux efforts, chocs, contraintes répétées qui fatiguent le métal.
- 3) Supporter les hautes températures sans que les dilatations ne perturbent le fonctionnement du moteur. La géométrie du piston, la matière dont il est constitué et éventuellement son refroidissement doivent résoudre ces problèmes thermiques.
- 4) Posséder des qualités de frottement et permettre l'adhérence de l'huile de lubrification pour limiter les risques de grippage et diminuer les pertes mécaniques pendant le mouvement alternatif. Le métal utilisé détermine ces qualités.

- 5) Donner à la chambre de combustion une géométrie permettant une meilleure combustion. La forme de la tête du piston est alors essentielle.

### Différentes formes de piston



## II- Problèmes mécaniques

### 1- Transmission des efforts

#### a) Exemple :

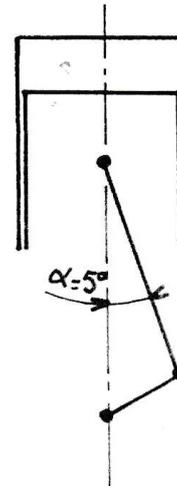
Considérons un piston de  $\varnothing 90$  mm et de course 80 mm.

Au moment où la bielle fait un angle de  $5^\circ$  avec l'axe du piston,

La pression dans le cylindre est de  $55 \text{ kg/cm}^2$ .

Calculer :

- La force de pression sur le piston.
- La composante parallèle à la bielle.
- La composante horizontale.



#### b) La tête du piston

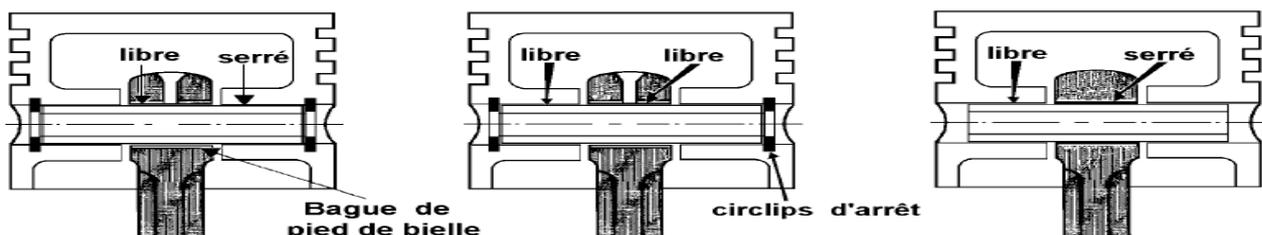
L'effort est d'abord subit par la tête du piston. L'épaisseur du fond doit être suffisante pour résister. Du point de vue résistance mécanique, les pistons en acier sont plus avantageux. Pour une même résistance, l'épaisseur d'acier nécessaire sera plus faible que celle d'un alliage léger. Le piston d'acier rattrape partiellement son handicap de poids.

#### c) Logement de l'axe du piston

Le piston est articulé sur la bielle par l'intermédiaire d'un axe qui transmet l'effort moteur. L'axe est logé dans deux bossages du piston. Le diamètre de l'axe et la longueur du bossage devront être tels que la pression de contact axe-piston soit supportable par le film d'huile de lubrification, et par les matériaux, surtout quand le piston est en alliage léger.

Il existe différents types de montages de l'axe du piston comme le montre les figures suivantes :

Figure IV.2- Représentation des logements de l'axe du piston



## 2- Guidage du piston

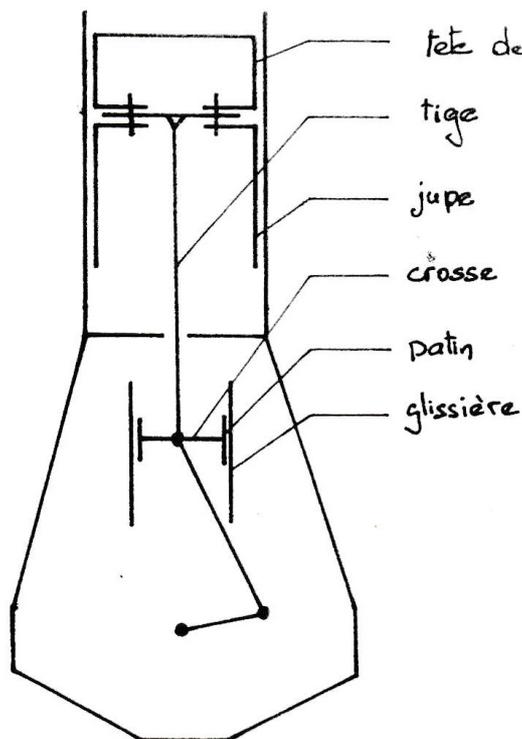
Un bon guidage du piston est nécessaire pour :

- ❖ Avoir une bonne étanchéité de la chambre de combustion.
- ❖ Limiter le mouvement transversal du piston dans le cylindre qui provoque des chocs répétés donc une usure plus rapide.

Pour cela, le jeu piston-cylindre doit être faible. La tête du piston, en contact avec les gaz brulés fortement échauffée, doit pouvoir se dilater. Un jeu trop faible provoquerait le grippage. C'est donc la jupe qui assurera le guidage.

Le jeu au niveau de la tête peut être de  $0.007D$  à  $0.005D$ , pour  $100\text{mm} < D < 200\text{mm}$  alors qu'à la jupe  $J=0.0015D$ . Le profil du piston n'est pas absolument cylindrique.

Sur certain gros moteur diesel, la fonction de guidage n'est pas assurée par le piston lui même.



Sur ces moteurs, la hauteur de jupe de piston, et la nécessité de séparer la partie cylindre de la partie carter ont conduit à réaliser des pistons à crosse.

L'effort horizontal ne s'exerce plus sur le piston, mais sur la tige au niveau du pied de bielle. Pour limiter la flexion de la tige, on la guide.

Elle est liée à une crosse sur laquelle s'articule la bielle.

La crosse comporte à chaque extrémité un patin qui frotte sur une glissière. Le mouvement est lubrifié.

Figure IV.3- Représentation du Guidage du piston

On trouve aussi des pistons à crosse sans tige. La crosse est alors directement liée à l'axe du piston et des pistons sans jupe. Le guidage étant assuré par les patins. On les appelle des pistons courts.

### 3- Basculement du piston

Quand le piston passe au PMH, la tête qui s'appuyait sur un côté du cylindre, bascule autour de son axe, et vient s'appuyer sur le côté opposé. Ce mouvement provoque un claquement d'autant plus important que si le jeu piston-cylindre est grand.

Pour limiter le bruit, on peut dessiner le piston avec un profil en forme de tonneau.

La jupe doit être suffisamment longue pour toucher le cylindre avant la tête. Le jeu étant plus faible au niveau de la jupe, le bruit de basculement sera plus faible.

D'autre part on peut limiter le basculement en décentrant l'axe du piston.

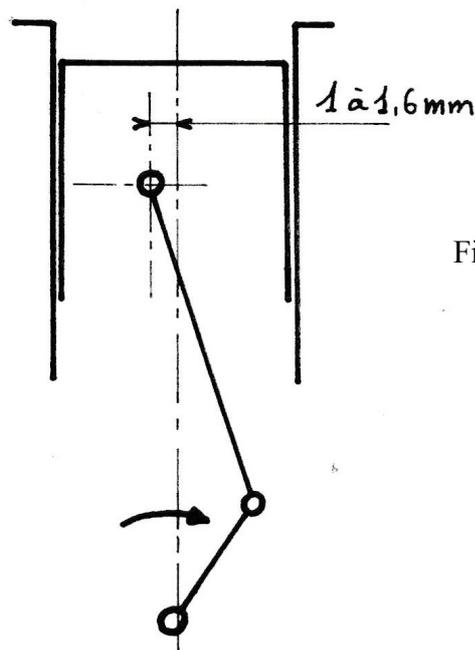


Figure IV.4- Basculement du piston

Les solutions permettant de limiter le claquement ne peuvent s'étudier qu'en même temps que les problèmes de dilatation. En effet la diminution du bruit et les jeux permettant la dilatation sont deux impératifs contradictoires.

Sur le moteur diesel, dans la plus part de ces utilisations, le bruit est un inconvénient secondaire, et on se préoccupera de donner des jeux de fonctionnement suffisant.

Sur le moteur à essence, on recherche un fonctionnement silencieux et la forme du piston est beaucoup plus travaillée pour éviter le claquement.

### 4- Inertie du piston

Le piston est animé d'un mouvement alternatif sinusoïdal pouvant atteindre 2000 tr/mn sur un petit moteur.

Un moteur automobile peut tourner à 6000 tr/mn, un diesel rapide à 2500 tr/mn et un diesel lent à 100 à 150 tr/mn.

**a) Exemple**

Si le piston de l'exemple précédent a une masse de 0.450 kg, et que le moteur tourne à une vitesse de 3000 tr/mn, calculer :

- Le nombre de courses du piston par seconde.
- Trouver l'équation du mouvement du piston.
- Quelle est sa vitesse moyenne ? sa vitesse maximale ? en quel point elle est atteinte ?
- Quelle est son accélération maximale ? en quel point elle est atteinte ?
- Quelles sont les forces d'inertie maximales qui s'exercent sur le piston ?

**b) Conséquences des forces d'inertie**

Ces forces d'inertie alternées provoquent la fatigue et l'usure des articulations du moteur (axe du piston, tête de bielle et paliers du vilebrequin). Si les jeux en ces points ne sont pas calculés au plus juste, le moteur claque. Il est bruyant et l'usure s'accélère.

Pour une masse donnée en mouvement, l'inertie provoque des vibrations. Au dessus d'une certaine vitesse de rotation, on risque de briser le vilebrequin ou la bielle qui ne résistent pas à la fatigue. Si on veut tourner plus vite le moteur (avoir plus de puissance), il faut donc alléger les pièces en mouvement par :

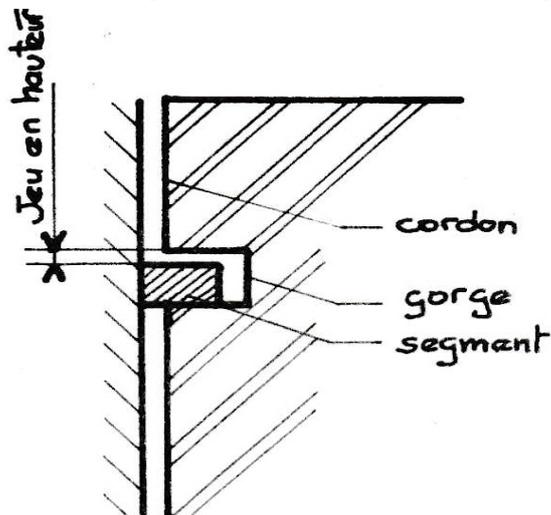
- ❖ L'étude des formes permettant la meilleure résistance pour une masse de métal donnée.
- ❖ Le choix du matériau. Les pistons peuvent être réalisés en fonte, acier ou alliage léger.
  - La fonte anciennement utilisée, présente de bonnes qualités de frottement, mais présente l'inconvénient du poids sans les avantages de la résistance.
  - L'acier possède de bonnes qualités mécaniques. Il est efficace contre :
    - Les contraintes alternées de pression.
    - Le matage des gorges de segments
    - Les contraintes thermiques.
    - Mais son poids important lui donne une grande inertie.
    - Ces qualités de frottement sont médiocres, et il faut traiter la

surface pour que l'huile de lubrification accroche.

–Les alliages légers donnent les meilleurs résultats du point de vue inertie (légèreté), évacuation des calories (bonne conductibilité thermique). Ils ont cependant de moins bonnes qualités mécaniques.

### 5- Matage des gorges de segment

Les segments sont des ressorts élastiques logés dans les gorges du piston.



Quand le piston monte et descend, le segment qui est libre dans la gorge, vient écraser la face supérieure puis inférieure de la gorge. Ces faces en alliage léger peuvent s'écraser progressivement (matées) par le segment en fonte.

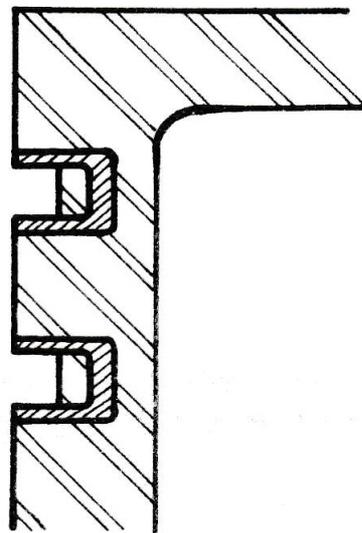
Figure IV.5-Matage des gorges de segment

Le matage provient souvent d'un jeu en hauteur important, ou d'un segment trop lourd.

Sur certain piston, on peut limiter le matage en des gorges de segments en acier.

#### Exemple de montage :

Les gorges sont placées dans le moule et s'intègrent directement au piston pendant le moulage.



## 6- Usure du piston

Le piston frotte contre le cylindre dans une direction perpendiculaire à son axe. L'usure, qui est nulle en marche normale, n'est plus négligeable au démarrage ou lorsque le moteur chauffe (mauvaise lubrification). L'ovalisation du piston, bien qu'elle soit beaucoup moins grande, et moins grave que celle de la chemise, n'est parfois pas négligeable.

Sur certains gros moteurs, on la limite en montant le pied de bielle non pas sur un axe, mais sur une rotule. Un système de crans permet de faire tourner régulièrement le piston sur lui-même.

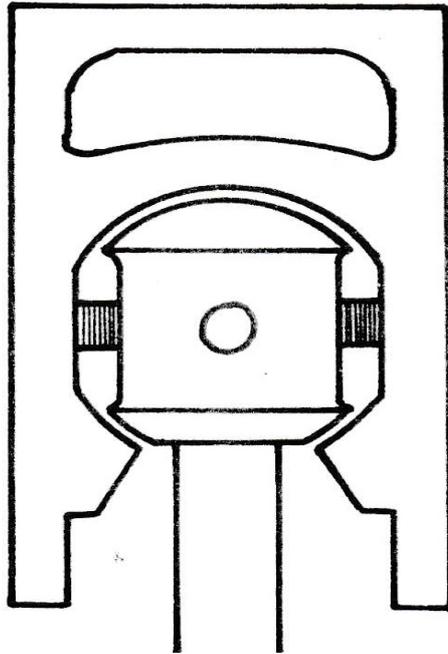


Figure IV.6- Montage du piston sur rotule

## III- Problèmes thermiques

### 1- Dilatation du piston

#### a) Position du problème

Le piston est soumis à la température des gaz de combustion.

Il est refroidi par :

- Les gaz du carter.
- Les gaz frais ou l'air admis dans le cylindre.
- L'huile de lubrification
- L'échange de chaleur avec la chemise (contacte segment-chemise) et la bielle.
- Dans certains cas par une circulation d'huile ou d'eau de réfrigération.

Le plus souvent :

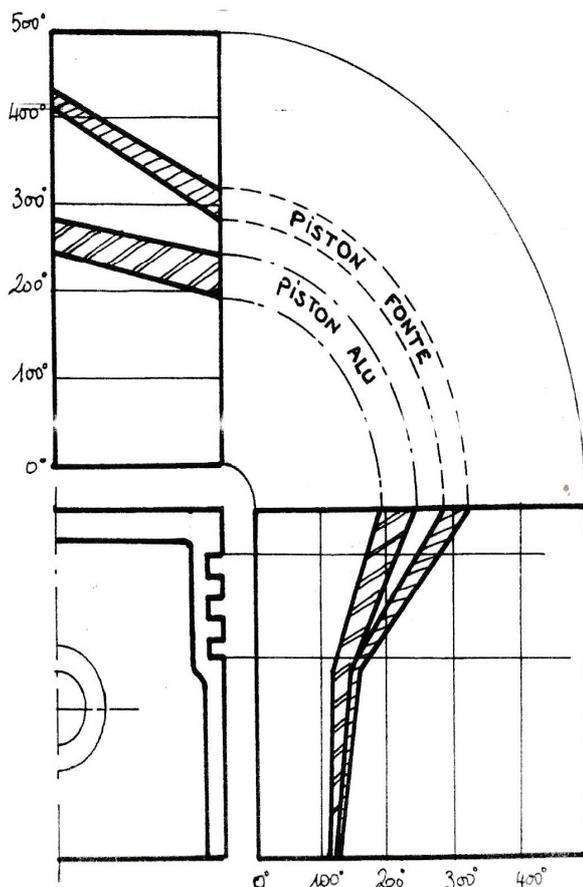
- Le piston n'a pas de réfrigération propre et sa température est plus élevée que celle des cylindres. Au démarrage elle augmente beaucoup plus vite.
- Le piston est en alliage léger et son coefficient de dilatation peut être double de celui de l'acier ou de la fonte. Donc si le jeu à froid est correct, il sera insuffisant à chaud (grippage). S'il est correct à chaud, on aura du claquement et une mauvaise étanchéité à froid.

Pour concilier les impératifs de silence et de bon fonctionnement, il faudra donner au piston des formes particulières. Elles seront plus étudiées sur les moteurs à essence, que sur les moteurs diesel (camions, industriels) où le silence de fonctionnement est moins important.

### b) Températures atteintes dans le piston

Les courbes de températures montrent qu'on aura une plus forte dilatation au niveau de la tête du piston qu'à celui de la jupe.

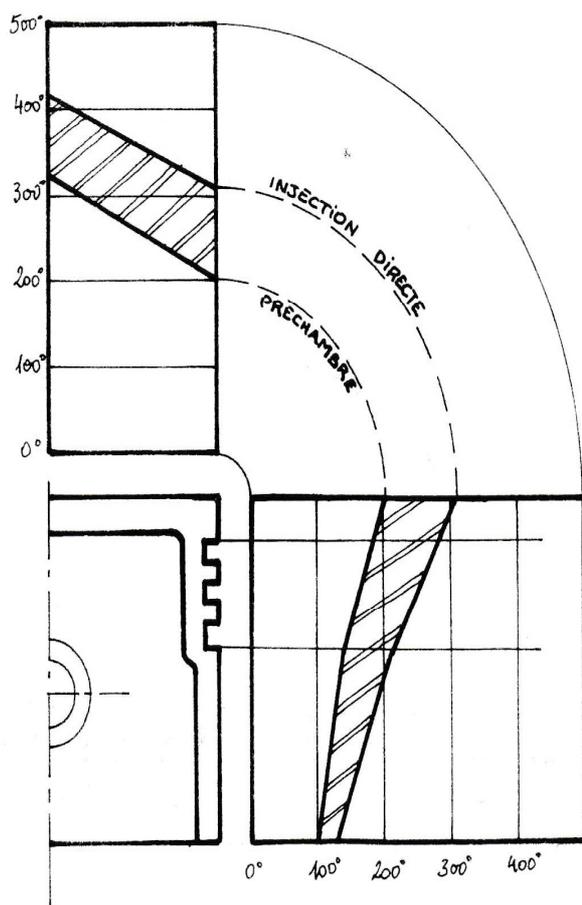
D'autre part, la dilatation sera plus grande là où les masses de métal seront plus importantes.



Températures de régime des pistons  
Moteurs 4T

Moteur à allumage commandé

Figure IV.7- Représentation des températures atteintes dans le piston moteur essence



Moteur diesel - piston alu.

Figure IV.8- Représentation des températures atteintes dans le piston moteur diesel

### c) Différentes solutions adoptées

❖ La dilatation étant moins importante au niveau de la jupe, on pourra diminuer le jeu piston-chemise quand on descend vers le bas de la jupe. Cela revient à réaliser des pitons coniques ou en forme de tonneau pour diminuer le claquement. Le jeu en tête de piston devra être important quand on utilise le moteur dans des conditions sévères : démarrage et montée en régime rapide pour les groupes électrogènes de secours.

❖ On pourra utiliser une jupe fendue. Ainsi au lieu de se dilater suivant son diamètre, elle se dilatera linéairement, tendant à refermer la fente et son diamètre variera peu.

❖ En liant la tête du piston aux bossages et non à la jupe, on diminuera la température de celle-ci.

❖ Comme le piston se dilate plus suivant l'axe des bossages, on pourra donner à la jupe une forme elliptique, permettant de diminuer le jeu dans le sens du basculement sans risque de grippage.

❖ Dans certains pistons, on intègre des anneaux d'acier dans la masse d'alliage léger au cours du moulage qui limiteront la dilatation.

## 2- Résistance aux contraintes thermiques

### a) Origine des contraintes

Le piston est soumis à des températures pouvant atteindre plus de 500 °C dans les moteurs diesel fortement chargés. L'alliage léger perd beaucoup de ces qualités mécaniques, quand il est soumis aux hautes températures, et les variations brusques de température peuvent faire apparaître des criques dans le métal. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la surface du piston présente des arêtes et des formes en creux (chambre de combustion dans le piston).

D'autre part, dans les moteurs à préchambre de combustion, le jet de gaz à très haute température sortant de la préchambre frappe le piston toujours au même endroit, bien localisé, ce qui crée une concentration de contraintes.

### b) Protection du piston

Si les températures atteintes sont trop fortes pour alliage léger, et si on désire garder le piston léger on peut :

- ❖ Inclure dans l'aluminium des parties d'acier dans les endroits les plus chauds, ce qui limitera également la dilatation de la tête du piston.

- ❖ Rapporter une tête de piston en acier sur une jupe en alliage léger, on réduit ainsi la dilatation des parties les plus chaudes, on protège le dessus du piston contre les hautes températures, on évite le matage des gorges de segments.

## 3- Auto – allumage

Sur les moteurs à allumage commandé, si la température de tête de piston est trop élevée (en particulier à cause des dépôts de carbone incandescent), un départ de flamme peut se créer spontanément près du point chaud provoquant de brusques surpressions dans la chambre avec risque de perçage du piston et fatigue de l'embiellage.

Sur les moteurs à allumage par compression (où l'auto – allumage est un phénomène presque normal), les risques sont moins gênants et on cherche parfois à réaliser les points chauds sur le dessus du piston.

## 4- Refroidissement du piston

### a) But du refroidissement

Le problème se pose essentiellement pour les pistons des moteurs diesel soumis à de hautes températures. Le but est de limiter la température de tête de piston pour que :

- ❖ L'alliage léger ne perde pas ces qualités mécaniques.
- ❖ La viscosité de l'huile entre piston et chemise ne diminue pas exagérément.
- ❖ L'huile ne carbonise pas dans les gorges de segments supérieurs (gommage).

La question de dilatation n'est pas primordiale pour les moteurs diesel car le bruit, donc le jeu important est plus facilement accepté.

### **b) Solutions adoptées**

Elles sont plus ou moins énergiques selon la température atteinte par le piston :

- ❖ Ecoulement de l'huile de lubrification raclée par le segment. Elle coule des segments racleurs vers les bossages et évacue une partie des calories de la jupe.

- ❖ Nervures sur le fond du piston, qui en plus de la rigidité qu'elles apportent au piston, elles augmentent la surface d'échange des calories avec les gaz dans le carter ou l'huile de lubrification.

- ❖ Projection de l'huile sur le fond du piston. L'huile de lubrification arrive au pied de bielle par un canal foré dans le corps. L'huile sous pression, est également entraînée par son inertie, est projetée sur le fond du piston. Le refroidissement est modéré. L'huile en contact avec le fond du piston chaud s'oxyde et forme des dépôts qui limitent l'échange thermique. Cette solution est économique mais moyennement efficace.

- ❖ Circulation de l'huile dans la tête de piston. Elle se fait soit par une cavité ménagée dans la tête de piston, soit par un serpentin qui passe en hélice près des gorges de segment. Il est noyé dans le piston au moment du moulage. Le refroidissement est plus efficace. L'huile peut arriver par le corps de bielle, par l'axe du piston (qui est creux), le bossage ou bien par l'intermédiaire d'un trombone.

- ❖ Circulation d'eau. Le principe est le même que pour l'huile. Le refroidissement est plus efficace. Le point délicat vient de l'alimentation en eau qui doit se faire à l'aide de tubes télescopiques coulissant les uns dans les autres. L'étanchéité doit se faire par presse étoupe. Toute pollution de l'huile par l'eau, entraîne la corrosion des paliers de vilebrequin. Le circuit d'eau douce est indépendant du circuit général de refroidissement.

## **IV- Etanchéité – Segmentation**

### **1- Principe**

Pour que le piston récupère le maximum du travail de pression des gaz brûlés, il faut que le cylindre soit étanche, donc qu'il n'y ait pas de passage des gaz brûlés vers le carter, entre piston et cylindre. Les problèmes de dilatation du piston et son mouvement de translation, imposent un jeu de fonctionnement de plusieurs centième (4 à 5/100 au niveau de la jupe pour un piston de Ø 85 mm).

L'étanchéité est résolue en introduisant dans les gorges du piston, des anneaux élastiques, qui en fonctionnent frottent contre la chemise.

Ces segments doivent être libres de se dilater et de se déplacer dans la gorge. Ils devront donc avoir :

- ❖ Un jeu en hauteur
- ❖ Un jeu à la coupe suffisant
- ❖ Un jeu en fond de gorge

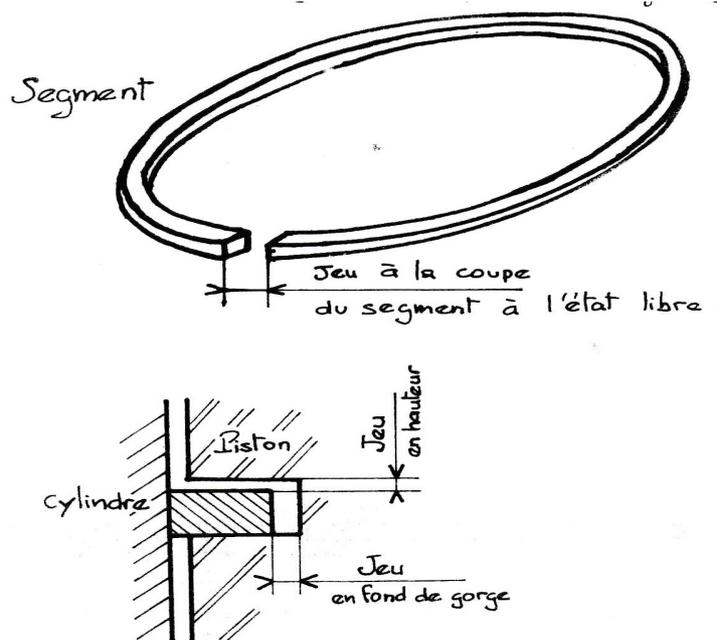


Figure IV.9- Représentation du segment de piston et des jeux de fonctionnement

On distingue :

- ❖ Les segments d'étanchéité

Ils doivent empêcher les gaz brûlés de passer vers le carter, ce qui provoquerait :

- Un échauffement excessif de la jupe (grippage).
- Une carbonisation de l'huile dans l'espace entre le piston et le cylindre (gommage).
- Une pollution de l'huile dans le carter par des produits de combustion d'où une perte des qualités lubrifiantes de l'huile.
- Un échauffement trop important de cette huile du carter d'où oxydation.

- ❖ Les segments racleurs

En frottant sur la chemise, ils ramènent l'huile vers le bas. En effet si elle arrive jusqu'à la chambre de combustion, elle brûle en laissant des dépôts de carbone qui peuvent constituer des points chauds (auto-allumage), ou s'accumuler dans les gorges de segments de

tête et les coincer (gommage). Le segment n'étant plus élastique ne joue plus son rôle d'étanchéité.

## 2- Les segments d'étanchéités

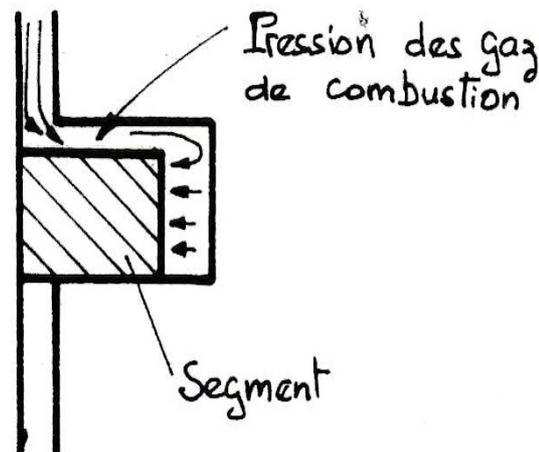
Ils sont situés en tête du piston. Ils sont appliqués contre la chemise non seulement par leur élasticité mais aussi par la pression des gaz de combustion.

Pour permettre cet effet de plaquage du segment, il faut qu'il soit libre dans la gorge (jeu en hauteur suffisant et pas de gommage)

Le segment coupe feu est le plus souvent cylindrique (section rectangulaire). C'est la forme qui assure la meilleure étanchéité au gaz. Sa surface en contact avec la chemise peut être chromée pour augmenter sa dureté superficielle et diminuer son usure.

C'est le segment dont la température la plus forte. Il est donc plus

sujet au gommage que les autres et son jeu à la coupe doit être plus important



Si le jeu entre le premier cordon et le cylindre est grand, il faudra que le segment coupe feu soit suffisamment bas pour échapper à l'effet des gaz brûlés qui pourraient le faire gommer.

Les segments suivants sont appelés segments de compression. Ils sont cylindriques, parfois coniques, ou de torsion. C'est deux formes assurent une étanchéité correcte tout en ramenant vers le bas l'excès d'huile de lubrification arrivant à la tête du piston.

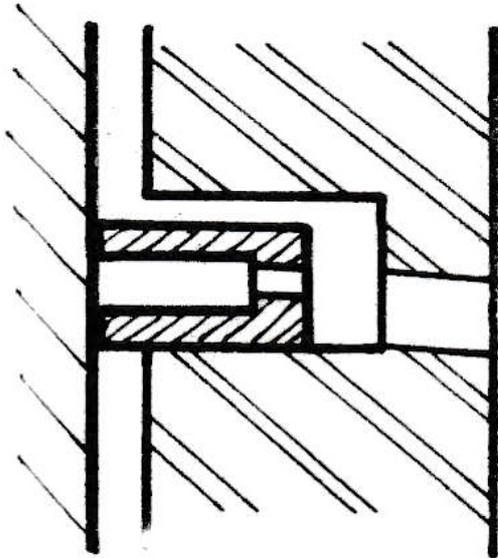
L'usure des segments et surtout le gommage sont décelables par le contrôle du débit de gaz dans le carter (Blow-by).

## 3- Segments racleurs

Ils doivent :

- ❖ Racler l'huile en excès sur la surface du cylindre.
- ❖ L'évacuer vers l'intérieur du piston.

Ils comportent généralement deux lèvres. Par effet de labyrinthe l'huile s'accumule entre les deux lèvres.



Elle est évacuée par des orifices pratiqués dans le segment et dans le piston en fond de gorge.

Si l'élasticité propre du segment à l'appliquer correctement contre le cylindre, on rajoute entre le segment et le fond de gorge un ressort appelé « épandeur ».

Généralement on trouve un segment racleur en dessous des segments d'étanchéités sur la tête du piston.

Quand il n'est pas suffisamment efficace (remonté d'huile vers les segments d'étanchéités), on rajoute un ou deux segments racleurs en bas de la jupe.

#### 4- Incidents de fonctionnement

##### a) Gommage du segment

Quand le segment est bloqué dans sa gorge par des dépôts de carbone, aussi bien à chaud qu'à froid, on dit que le segment est gommé. S'il est libre à chaud, on dit qu'il est pincé.

Un segment gommé n'assure plus l'étanchéité. Les gaz brûlés passent dans le carter. On risque rapidement le gommage des segments suivants.

Comme il n'est plus libre sur son pourtour, il travaille en flexion et il risque la rupture à proximité du point de gommage.

Si on décèle le gommage d'un segment avec le contrôle Blow-by, il faut nettoyer la gorge, éventuellement changer le segment, et surtout chercher la cause du gommage.

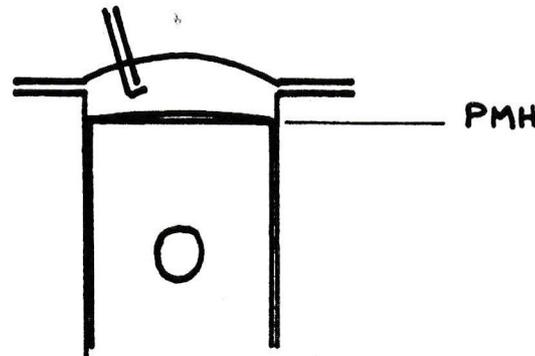
##### b) Rupture du segment

Un segment rompu n'est plus étanche. Il ne reste pas appliqué contre la chemise et on l'entend claquer dans sa gorge. Il raye les parois du cylindre et doit être changé au plus vite.

## V- Formes du piston liées aux problèmes de la combustion

### 1- Moteur à allumage commandé

Sur ce moteur l'essentiel de la chambre de combustion est formé par la culasse hémisphérique. Le dessus du piston a une forme plate ou légèrement bombée et arrive à quelques mm du haut du cylindre.



Sur certains véhicules, la tête de piston a une forme plus irrégulière, ayant pour but d'améliorer la turbulence des gaz frais au cours de la compression.

Il est toutefois à remarquer que plus la surface de la chambre à combustion augmente, plus les pertes calorifiques vers la paroi sont importantes et moins bon est le rendement du moteur.

### 2- Moteur à allumage par compression

On distingue deux types de moteurs :

- A préchambre de combustion
- A injection directe

Dans les moteurs à préchambre de combustion, le piston a une forme plate et arrive au ras de la culasse. Parfois on y usine des évidements de faibles profondeurs destinés à faire tourbillonner les gaz sortant de la préchambre. Les chambres de réserve d'air (cellule d'énergie), ont le même principe de fonctionnement que les préchambres.

Dans le moteur à injection direct, le piston peut être plat (moteur lent). Mais le plus souvent, la chambre de combustion est incluse dans le piston. Il a une forme creuse pour favoriser la turbulence.

Dans les deux cas, on usine le plus souvent des logements pour les soupapes sur la tête de piston. En effet, en fin de refoulement et début d'admission, les soupapes sont ouvertes alors que le piston est au PMH. On ne doit pas avoir de chocs entre eux.

Cependant, plus la surface du piston est compliquée, plus on a des risques de criques dues à des contraintes thermiques localisées. D'autre part, l'augmentation de la surface de la

chambre de combustion augmente les pertes d'énergie par échange calorifique gaz-paroi. Le rendement du moteur devient plus faible.

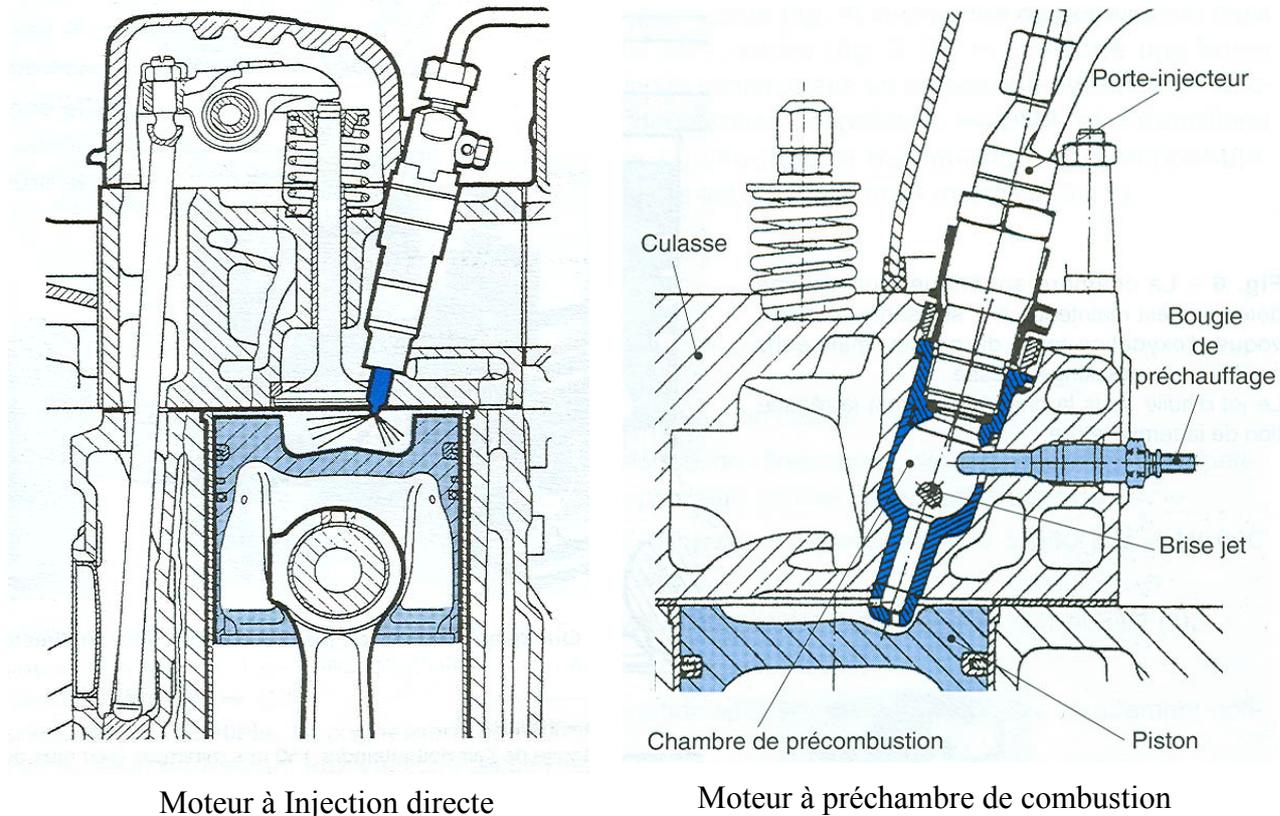


Figure IV.10- Représentation des Moteurs, à Injection directe et à préchambre de combustion

## VI- Lubrification du mouvement

### 1- Moyens de graissage

L'huile doit arriver sur les parois du cylindre et former une couche mince.

a) Sur les petits moteurs, l'huile arrive par projection. Par exemple, la tête de bielle est prolongée par un becquet qui accroche de l'huile dans le carter au PMB et la rejette vers le haut au PMH.

L'huile peut également arriver par l'axe du piston, quand un canal de lubrification est foré dans la bielle.

Certain petit moteur 2T sont équipés d'un graissage séparé, l'huile sous pression arrive par des canaux forés dans le cylindre.

b) Sur les gros moteurs, la pompe à huile alimente des canalisations qui débouchent sur le cylindre. Des saignés de faible profondeur permettent de répartir le graissage sur toute sa surface.

## 2- Comportement du film d'huile

Il s'interpose entre le piston et le cylindre. En marche normale on n'a pas de contact métal sur métal. On peut avoir contact au démarrage ainsi qu'au PMH et au PMB, quand la vitesse du piston est nulle, si la viscosité de l'huile est trop faible (température excessive). C'est alors qu'on a usure.

L'huile qui remonte le long du cylindre pendant la course montante du piston est partiellement brûlée quand le piston redescend au cours de la combustion. La consommation d'huile est directement liée à l'épaisseur du film, donc à l'efficacité des segments.

## 3- Adhérence de l'huile

L'huile adhère bien sur les pistons en fonte, moyennement sur ceux en alliage léger, mal sur ceux en acier. Les pistons en acier et parfois en alliage léger devront recevoir un revêtement superficiel.

- Oxydation anodique (Alumine)
- Dépôt électrolytique (Etain - Cadmium)

## B/ La Bielle

### I- Généralités

#### 1- Fonction – Contraintes

Elle transforme le mouvement alternatif du piston en mouvement de rotation du vilebrequin.

La pression de combustion et la résistance de l'arbre moteur font subir à la bielle un effort de compression. Cette contrainte est la principale, mais sur les moteurs rapides, les forces d'inertie ne sont pas négligeables et jouent un grand rôle dans la fatigue du matériau.

#### 2- Description

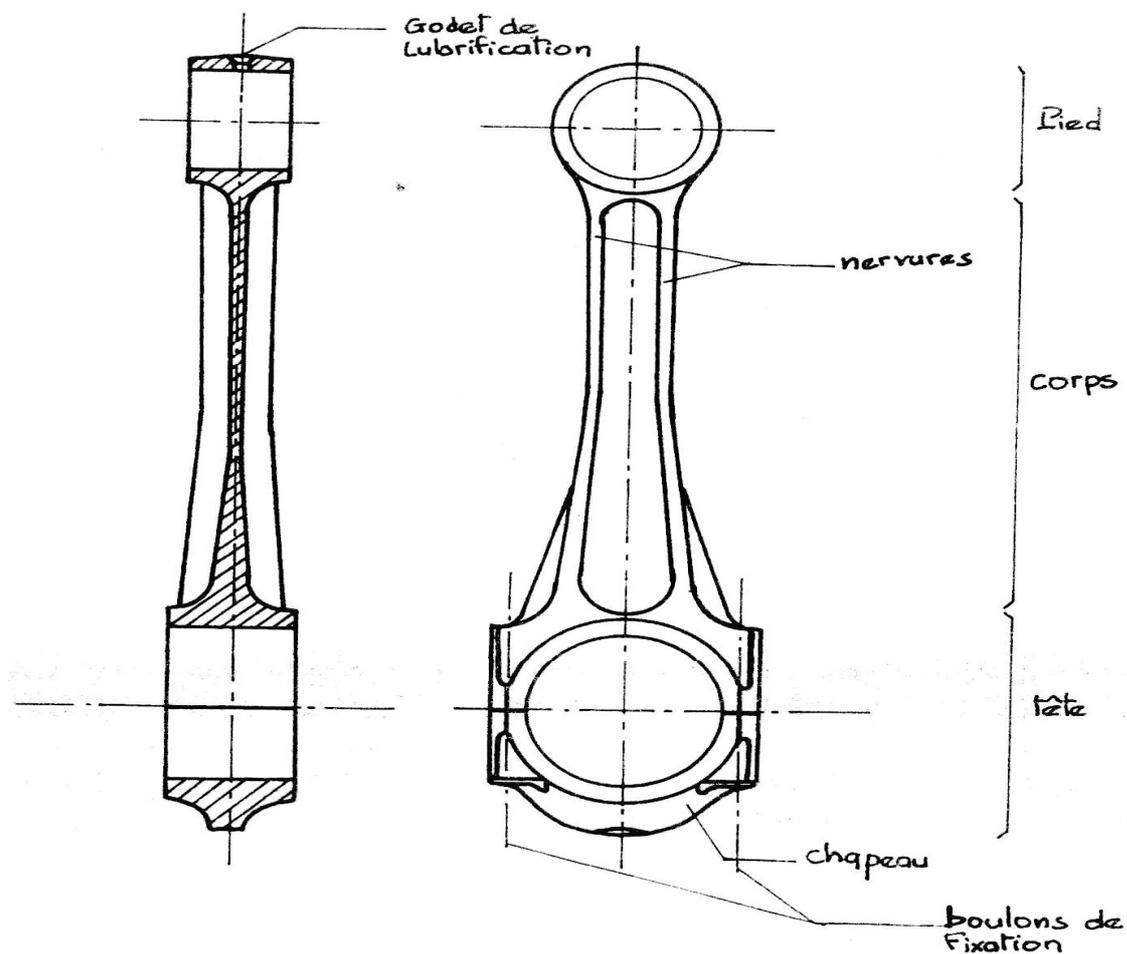


Figure IV.11- Représentation de la bielle

Le pied de bielle reçoit une bague de frottement et l'axe du piston. La tête de bielle, en deux parties est munie de coussinets antifricition. Elle est boulonnée autour du maneton du vilebrequin.

La longueur de la bielle est la distance entre ses axes.

### 3- Fabrication

Les bielles sont le plus souvent en acier au carbone ou au Ni Cr et forgées.

On utilise parfois de la fonte à graphite sphéroïdal et dans des applications particulières des alliages légers (moteur d'avion), elles sont alors moulées.

## II- Pied de bielle

C'est la partie de la bielle liée à l'axe du piston. On distingue deux types de montage.

### 1- Axe fixe

Le serrage de la bielle sur l'axe se fait par vis, clavette ou emmanchement forcé.

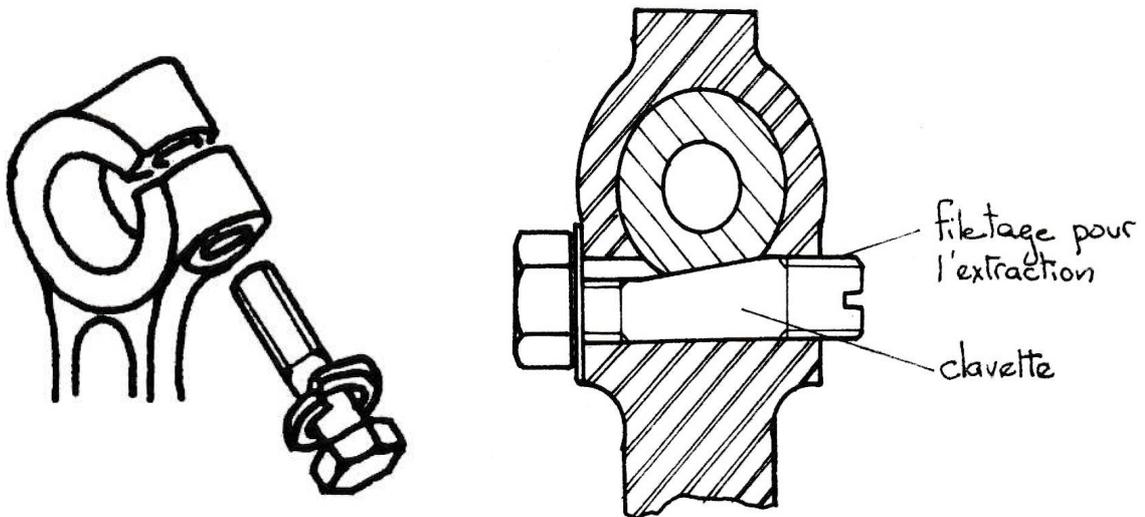


Figure IV.12- Représentation des montages de l'axe sur le pied de bielle

### 2- Axe mobile

C'est le montage le plus courant. Il faut prévoir le frottement bielle – axe. Dans la plus part des cas, on monte une bague en bronze qui peut être serrée dans l'alésage ou libre aussi bien sur l'axe que sur l'alésage.

## II- La tête de bielle

### 1- Montage

Elle est montée autour du maneton. Dans presque tous les cas le vilebrequin est en une seule pièce et il faut faire la tête en deux parties. Le chapeau de bielle vient se fixer sur le corps par des vis ou des boulons.

Comme on cherche à la fois :

- Un bon serrage du chapeau.
- Un faible encombrement et un faible poids du boulon, il en réduire les dimensions et utiliser de l'acier au NiCr de résistance 100 à 120 kg/mm<sup>2</sup>.

Le couple de serrage est fixé par le constructeur. Les écrous ou les têtes de vis doivent être arrêtés (tôle repliée, écrou indesserrable).

Le centrage du chapeau est important car l'alésage doit être bien cylindrique. Il est assuré par :

- Un changement de diamètre sur le corps du boulon.
- Des tétons ou des striures sur les deux faces du plan de joint pour une fixation par vis. Le plan de joint peut être horizontal ou oblique.

Ce dernier montage permet de retirer l'ensemble piston – bielle à travers le cylindre. Dans ce cas, les striures ou les tétons permettent d'absorber une partie de la composante latérale de la poussée sur la tête de bielle.

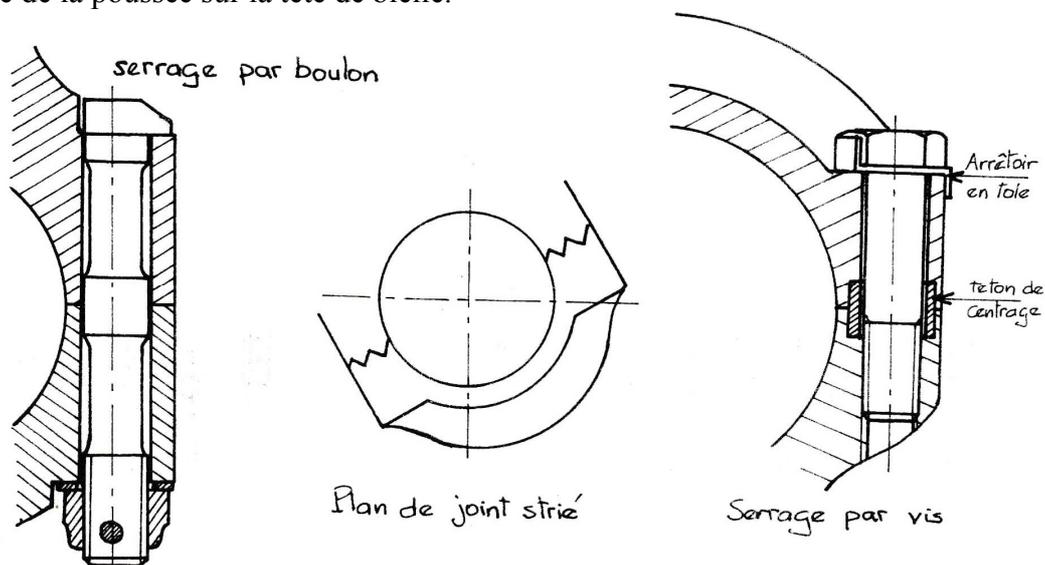


Figure IV.13- Représentation des montages de la tête de bielle

## 2- Bielles pour moteurs en V

Sur les moteurs en V, les bielles des deux cylindres opposés sont liées au même maneton. Plusieurs possibilités de montage sont employées sur les moteurs.

### ➤ Bielles accolées

C'est la solution la plus simple et la plus répandue. Les têtes de bielles sont simplement montées côte à côte sur le maneton. Cependant, on double la largeur du maneton et les cylindres opposés sont légèrement décalés. Cela provoque une augmentation de l'encombrement et du poids du moteur.

### ➤ Bielles à fourches

Une des bielles est une fourche dans laquelle se déplace la deuxième bielle. La masse des têtes de bielle tournantes est importante et le prix de revient est important.

➤ **Bielles à œil**

Une petite bielle appelée « Biellette », vient s'articuler sur la tête de bielle principale. Ce système conduit à une faible largeur du maneton, mais les courses des pistons ne sont pas identiques. Il faut donc modifier le volume mort d'une série de cylindres pour avoir le même taux de compression.

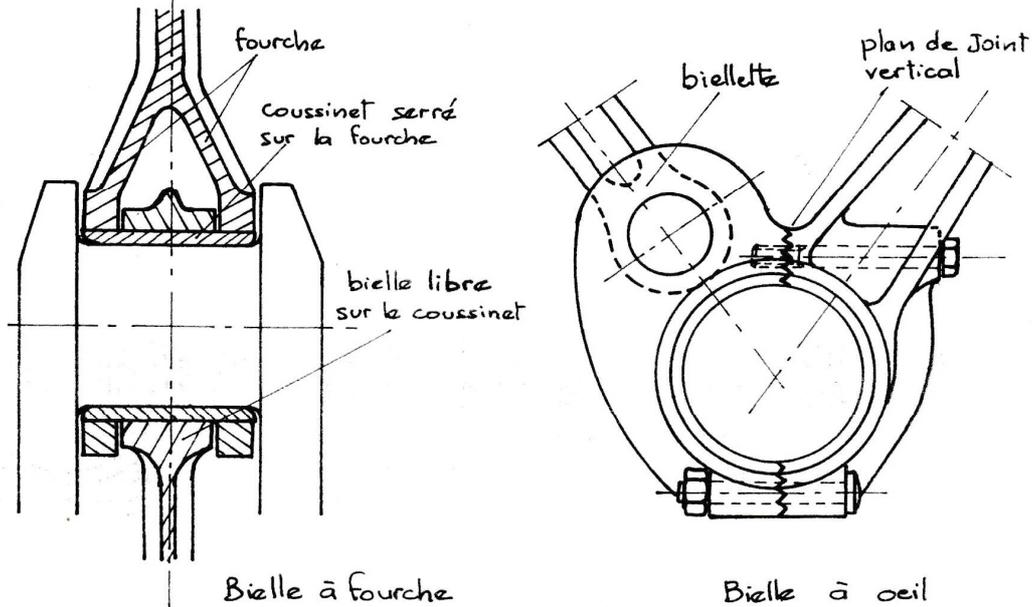


Figure IV.14- Représentation des montages de la tête de bielle à fourche et à œil

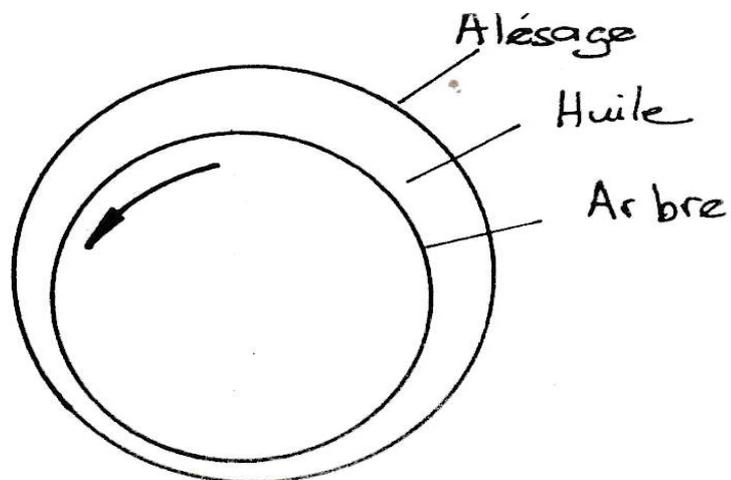
**III- Les coussinets**

**1- Lubrification d'un mouvement de rotation**

Quand un arbre tourne dans un palier, on interpose un film d'huile entre les deux pièces. L'huile entraînée par l'arbre forme un matelas protecteur d'épaisseur variable qu'on appelle coin d'huile.

En marche normale, on n'a jamais contact métal sur métal et c'est sur du liquide que repose le vilebrequin et la bielle.

Le jeu entre arbre et alésage est en réalité beaucoup plus faible que sur le croquis.



L'avantage essentiel est la suppression des frottements solides qui aboutiraient à la destruction rapide des organes en contact. Le coefficient de frottement d'un mouvement lubrifié est très faible. L'huile joue en plus le rôle d'un amortisseur quand l'arbre (vilebrequin) et l'alésage (bielle) sont soumis à des efforts variables.

Le film d'huile est très solide et peut supporter des charges importantes. Il est des cas où on peut avoir contact arbre-alésage.

– Au moment du démarrage, quand le film d'huile n'est pas encore établi. Le temps de frottement dure moins d'un tour du vilebrequin.

– Quand le film d'huile est cassé par une irrégularité de surface (impureté), ou parce qu'il est trop fluide (échauffement excessif).

C'est pour ces périodes de frottement arbre-alésage qu'il faut prévoir un métal intermédiaire dont le coefficient avec l'arbre soit faible.

## 2- Matériaux utilisés

Les principaux sont :

➤ Les alliages à base de plomb ou d'étain (métal blanc). Ce sont des alliages mous à bas point de fusion. Le coefficient de frottement avec l'acier est faible, mais leurs qualités mécaniques sont faibles. Dans les moteurs chargés, la couche antifriction peut se déformer et même fondre en cas de mauvaise lubrification et d'échauffement excessif.

➤ L'argent qui a de bonnes qualités mécaniques (résistance aux contraintes) et de frottement étaient utilisés dans les moteurs d'avion. Son prix est élevé.

➤ Les Cuproplomb (métal rose), ce sont des mélanges de cuivre et de plomb, et non des alliages. Ils ont l'avantage d'une bonne résistance mécanique, mais leurs qualités de frottement sont faibles. On rajoute souvent une couche électrolytique de plomb et d'étain sur une base de cuproplomb pour améliorer le coefficient de frottement.

➤ Il existe aussi des alliages de cadmium, d'aluminium, mais peu utilisés.

## 3- Formes du coussinet

Sur les anciens moteurs, on déposait la couche antifriction directement sur la tête de bielle. On l'appelait bielle régulée.

Actuellement, on dépose le métal antifriction en couche mince sur un support en bronze ou en acier doux.

Les deux demi-coquilles sont disposées dans les paliers du vilebrequin ou dans l'alésage de tête de bielle.

Elles sont immobilisées en rotation par une languette. Elles sont percées pour l'arrivée ou le départ d'huile et une rainure de faible profondeur permet la répartition d'huile sur toute la circonférence du coussinet.

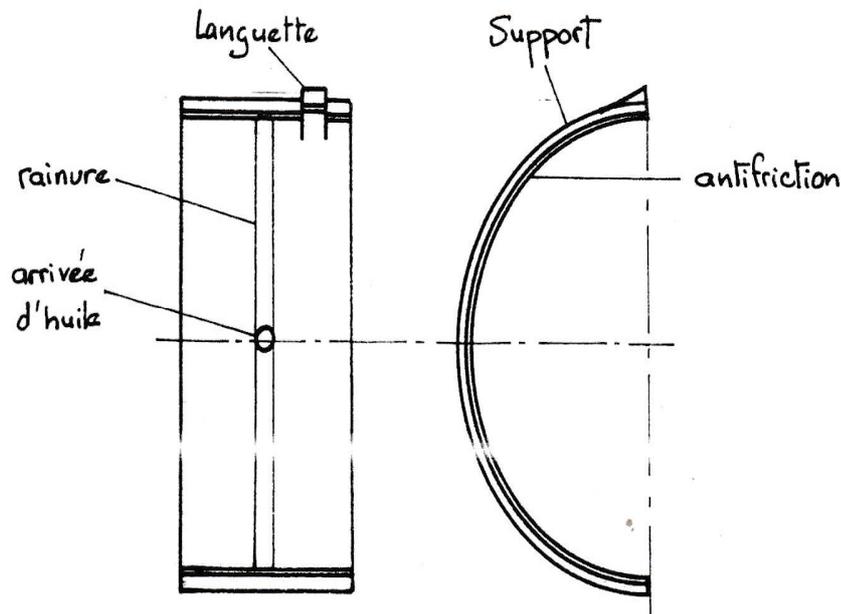


Figure IV.15- Représentation du coussinet

#### 4- Défauts de fonctionnement

Pour les antifrictions à bas point de fusion, un échauffement excessif peut se traduire par une fusion de la garniture, c'est ce que l'on appelle le coulage.

Pour les cupro-plombs, si on a un défaut de lubrification, on risque le grippage. Le contact vilebrequin-antifricction provoque l'arrachement de la garniture.

Sans aller jusqu'à la destruction complète de la couche de frottement, on peut avoir :

- Ecaillage de la surface.
- Incrustation de particules étrangères qui rayent le vilebrequin.
- Corrosion de l'antifricction par l'huile de lubrification.
- Décollement de la garniture de son support.

Dans tous les cas de défaut des coussinets, on les change.

## C/ Le Vilebrequin

### I- Fonction – Description

Le vilebrequin doit transmettre à l'utilisation l'énergie fournie par le piston. Les bielles articulées sur des manetons font tourner le vilebrequin autour de son axe (ligne d'arbre), par l'intermédiaire de bras manivelle. Les tourillons tournent dans des paliers équipés de coussinets. Certains tournent sur des roulements à rouleaux.

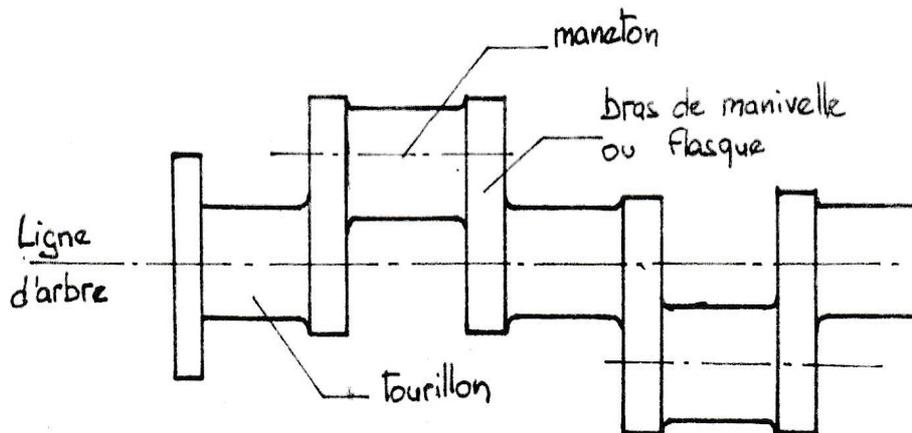
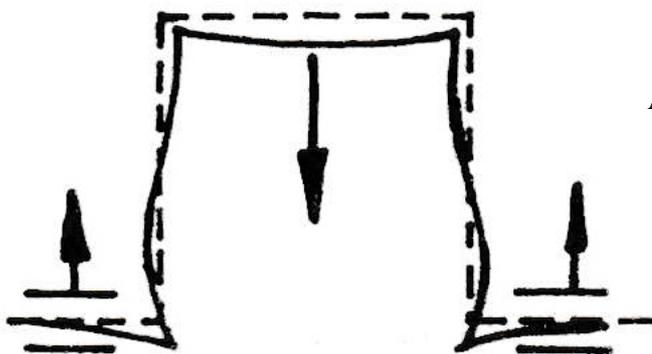


Figure IV.16- Représentation du vilebrequin

### II- Contraintes appliquées

1- Le vilebrequin est soumis à d'importantes contraintes alternées.

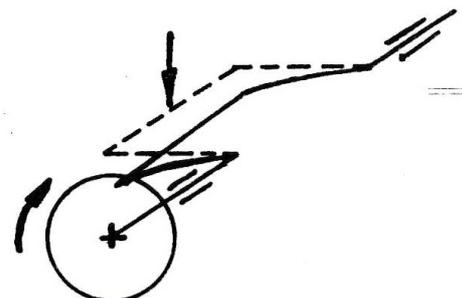
#### ➤ En flexion



Action de la bielle pendant le temps moteur, réaction des paliers.

#### ➤ En torsion

Action de la bielle, réaction en bout d'arbre



Ces contraintes provoquent la fatigue du métal pouvant aller jusqu'à la rupture, s'il y a un défaut, même léger, de fabrication ou de construction du vilebrequin.

En particulier :

- Un jeu important aux paliers (usure des coussinets), permet de trop grandes déformations de flexion pouvant entraîner la cassure des flasques.
- Un mauvais alignement des paliers, du à une déformation du bâti, provoque à chaque tour une flexion de l'arbre.

## 2- Vibrations

Le moteur tourne à des vitesses variables. Certaines vitesses correspondent à des fréquences propres du vilebrequin, c'est-à-dire des fréquences pour lesquelles l'amplitude de vibration du vilebrequin augmente brusquement.

Il existe des vibrations de flexion, mais les plus dangereuses pour le vilebrequin sont les vibrations de torsion.

Pour limiter ces vibrations, il faut tout d'abord que le vilebrequin soit équilibré :

- **Statiquement** : Son centre de gravité doit se trouver exactement sur l'axe.
- **Dynamiquement** : A l'opposé de chaque maneton on monte des contrepoids, sur les flasques, qui équilibrent la masse en rotation bielle-maneton.

Le calcul de ces contrepoids et l'équilibrage dynamique sur banc où on contrôle l'amplitude de vibration permettent d'éliminer ou de réduire les vibrations dangereuses.

## 3- Amortisseurs de vibrations

Sur les moteurs subissant de fortes pressions de combustion, on peut trouver une ou deux fréquences dangereuses même après équilibrage. On dispose alors en bout d'arbre un amortisseur de vibration de torsion.

- Amortisseur à friction
- Amortisseur à frottement visqueux
- Amortisseur à caoutchouc
- Oscillateur pendulaire

Les trois premiers sont basés sur le même principe. Un disque est lié au vilebrequin, un deuxième disque est :

- Soit libre en rotation et lié au premier par frottements secs ou visqueux.
- Soit relié au premier par une masse en caoutchouc.

En marche normale, l'ensemble tourne à la même vitesse que le vilebrequin. Quand on a des vibrations, il y a déplacement relatif des deux disques sous l'effet de petites

accélérations alternatives. Le frottement ou la déformation du caoutchouc absorbent alors l'énergie de la vibration. On a amortissement.

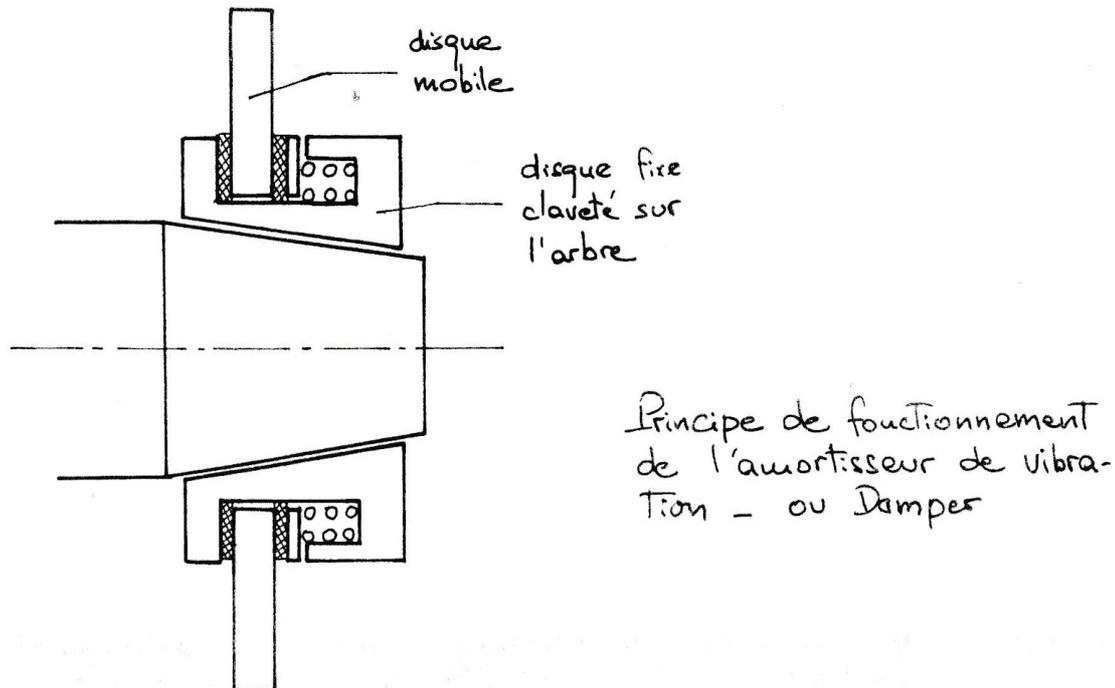


Figure IV.17- Représentation de l'amortisseur de vibration

Le quatrième est une masselotte pouvant tourner autour d'un axe situé sur un flasque. Les oscillations propres du pendule s'opposent à une ou deux vibrations critiques du vilebrequin.

### III- Technologie

#### 1- Construction

Le vilebrequin peut forgé, coulé ou assemblé. Le plus résistant est obtenu par forgeage. C'est lui qui équipera les moteurs diesel et certains moteurs à essence.

Le vilebrequin coulé peut plus facilement être produit en grande série et sa résistance est suffisante pour de nombreux moteurs à essence.

Les vilebrequins assemblés ne sont utilisés que dans quelques types de constructions. Ils permettent de ne pas couper les têtes de bielle et de les monter sur roulements ainsi que sur les paliers. L'usinage est simplifié. La résistance est moins bonne que pour les vilebrequins en une seule pièce.

#### 2- Matériau utilisé

On peut employer la fonte, qui est coulé, mais son emploi est limité. Les bonnes qualités de frottement de la fonte constituent son avantage principal. Les aciers utilisés

doivent être alliés au Ni.Cr, Cr.Mo, Ni.Cr.Mo et trempés. Les moteurs diesel sont presque tous en acier.

### 3- Finitions

Les portés doivent être durcis par trempée superficielle, cémentation ou nitruration. Elles sont ensuite polies pour donner un état de surface brillant. Ainsi un film d'huile régulier peut s'établir dans le jeu entre portées et coussinets.

Les contrepoids sont rapportés sur les flasques ou viennent directement de fonderie ou de forge, formant ainsi une seule masse avec les flasques. La masse exacte des contrepoids est obtenue par enlèvement de matière (par exemple perçage pendant l'équilibrage sur le banc).

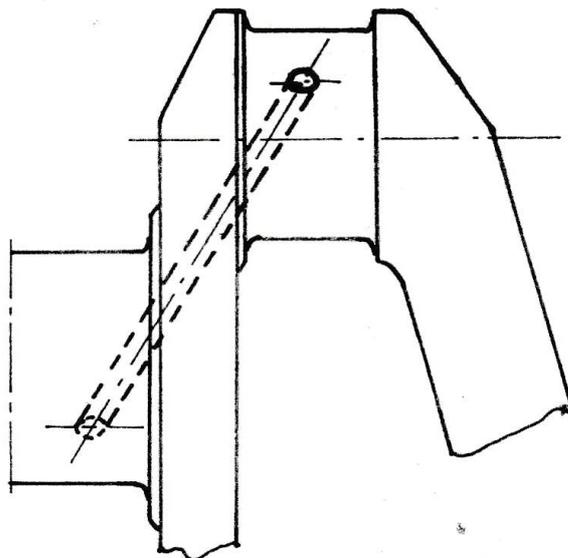
Généralement les manetons et souvent les tourillons sont percés pour alléger le vilebrequin et diminuer son moment d'inertie. Sur les vilebrequins coulés, les trous viennent de fonderie. S'ils sont forgés, il faut percer les évidements.

## IV- Lubrification

L'huile de lubrification arrive sous pression de la rampe. Elle est distribuée à chaque palier. Elle doit lubrifier le mouvement de chaque maneton et tourillon puis éventuellement remonter jusqu'à l'axe du piston par un canal foré dans la bielle.

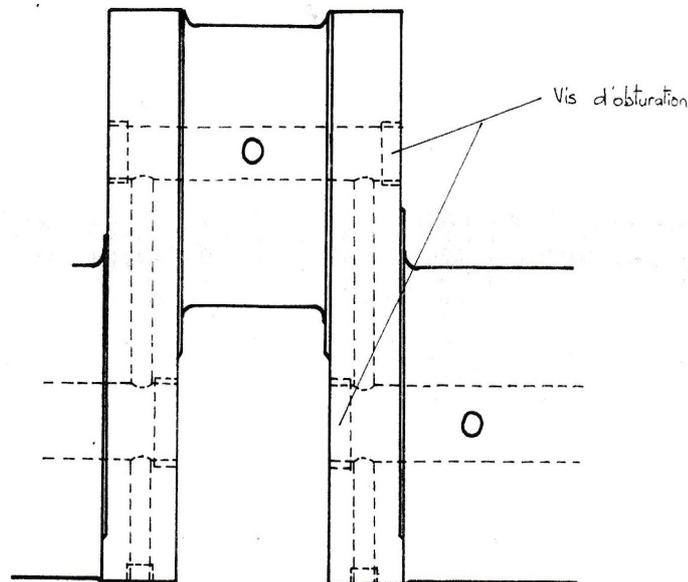
### 1- Vilebrequin non évidé

On fait correspondre chaque maneton à un palier par un perçage oblique.



## 2- Vilebrequin évidé

On se sert généralement des évidements pour la circulation de l'huile, en les faisant communiquer par des percages. Il faut alors boucher les évidements.



## V- Etanchéité en bout d'arbre

Elle se fait à l'aide d'une turbine filetée ou moletée qui ramène l'huile vers l'intérieur du carter quand le vilebrequin tourne. Sur le palier avant, en communication avec l'atmosphère, la turbine risque de faire pénétrer des poussières. Il faut rajouter un joint d'étanchéité (bague à lèvres, tresse ...).

On limite d'autre part la quantité d'huile arrivant jusqu'à la turbine à l'aide d'un déflecteur. Quand il tourne, il projette le lubrifiant dans une gorge et un canal le ramène au carter.

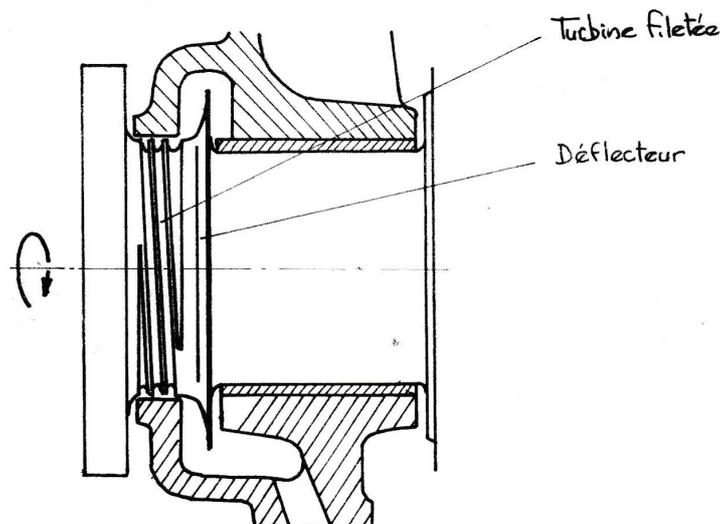


Figure IV.18- Système d'étanchéité en bout d'arbre

## VI- Accessoires liés au vilebrequin

### 1- Volant moteur

C'est un disque vissé sur l'extrémité du vilebrequin, et dont le moment d'inertie est important. Il sert à réguler le couple moteur. Il est d'autant plus nécessaire que le moteur a moins de cylindres.

Par exemple, sur un moteur monocylindre, il emmagasine une partie de l'énergie fournie par le piston, pendant le temps moteur, et la restitue pendant les trois autres temps. La vitesse et le couple sont ainsi régularisés.

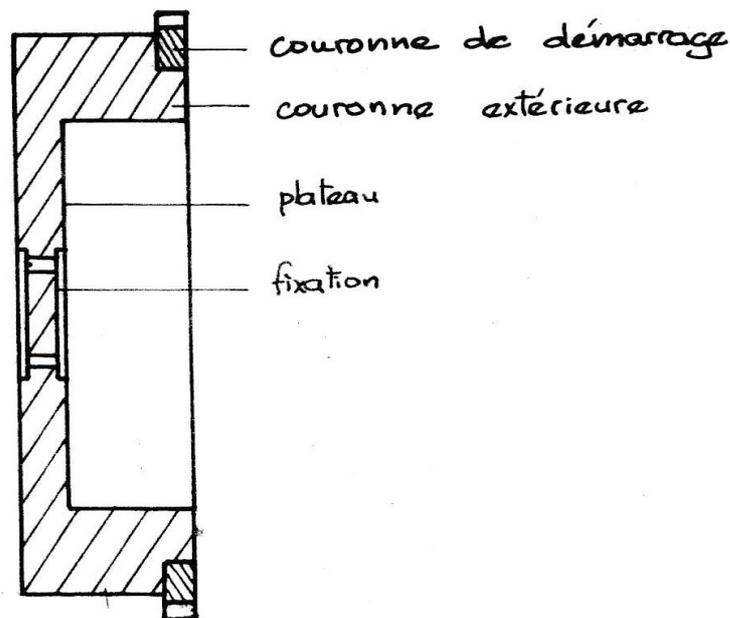


Figure IV.19- Représentation du volant moteur

On peut trouver sur le volant une couronne d'entraînement pour un démarreur électrique (petit moteur), ou pour un vireur (gros moteur) ainsi que des repères du PMH et de l'avance à allumage.

### 2- Poulies et couronnes

Le vilebrequin doit transmettre son mouvement à différents organes du moteur. On peut trouver en bout :

- Un engrenage ou pignon de chaîne pour l'entraînement de la distribution.
- Une poulie pour l'entraînement de l'alternateur et du ventilateur.

# La Distribution

## **I- L'arbre à cames**

- 1- L'entraînement**
- 2- Caractéristiques**
- 3- Détérioration de l'arbre à cames**

## **II- Poussoirs et tiges**

## **III- Culbuteurs**

- 1- Fonction et caractéristiques**
- 2- Jeux et réglages**

## **IV- Soupapes**

- 1- Fonction et caractéristiques**
- 2- Sièges de soupapes**
- 3- Guides de soupapes**
- 4- Ressorts**

## **V- Lubrification**

## **VI- Dispositions particulières**

## La Distribution

La distribution est l'ensemble des organes permettant l'alimentation en gaz frais (mélange air-essence) et l'échappement des gaz brûlés, à chaque cycle, au moment voulu et pendant un temps bien déterminé.

On ne trouve pas de distribution sur les moteurs à 2 T à lumière. Sur les autres (4T et 2T à soupape d'échappement), la distribution est assurée par des soupapes qui ouvrent et ferment les orifices d'admission et d'échappement. Le mouvement des soupapes est commandé par un arbre à cames entraîné par le moteur. Des tiges et leviers appelés culbuteurs transmettent la commande de la came à la soupape.

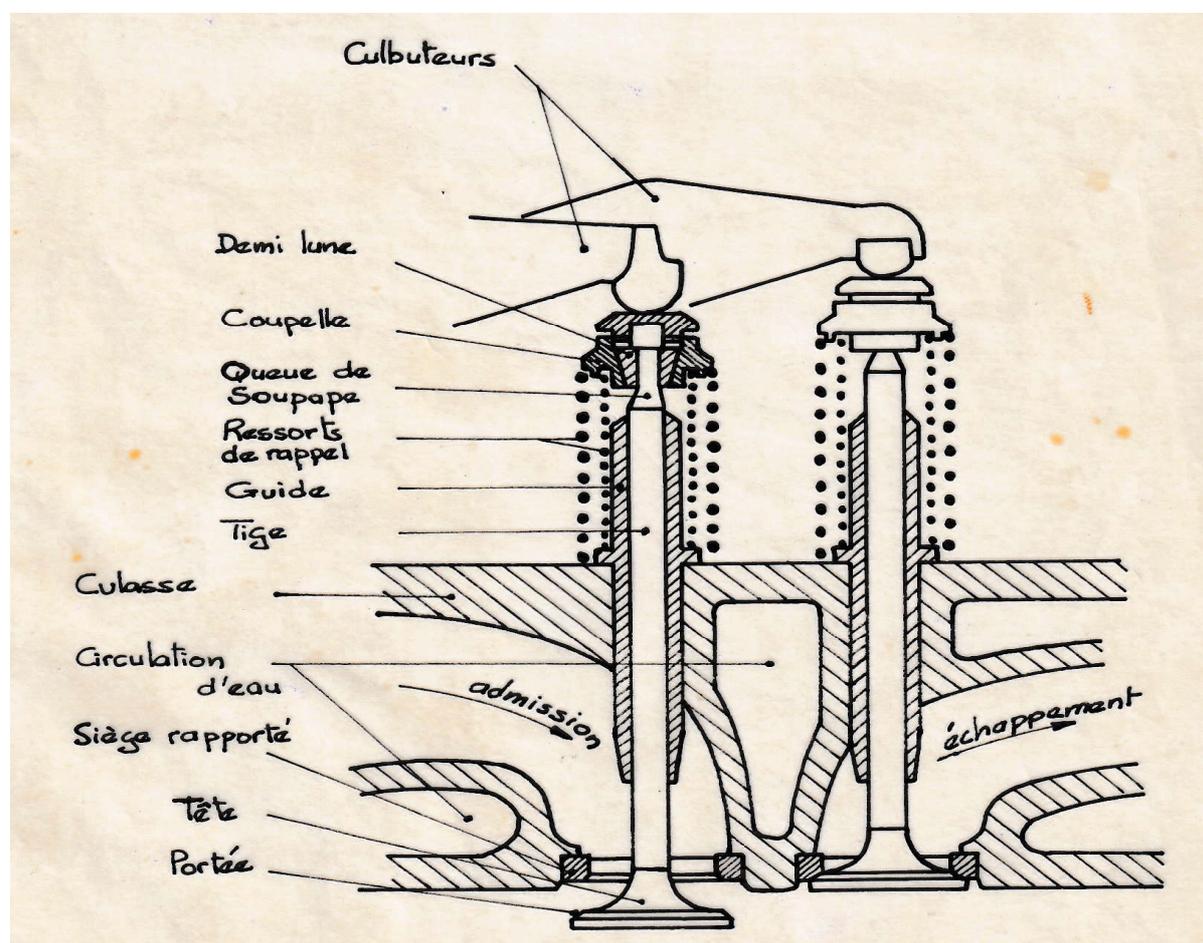


Figure V.1- Organes de distribution des gaz frais et brûlés

Nous allons étudier en détail la disposition la plus courante de la distribution, par arbre à cames dans le carter, tiges et culbuteurs.

En fin de chapitre, nous verrons d'autres montages possibles pour les soupapes et l'arbre à cames.

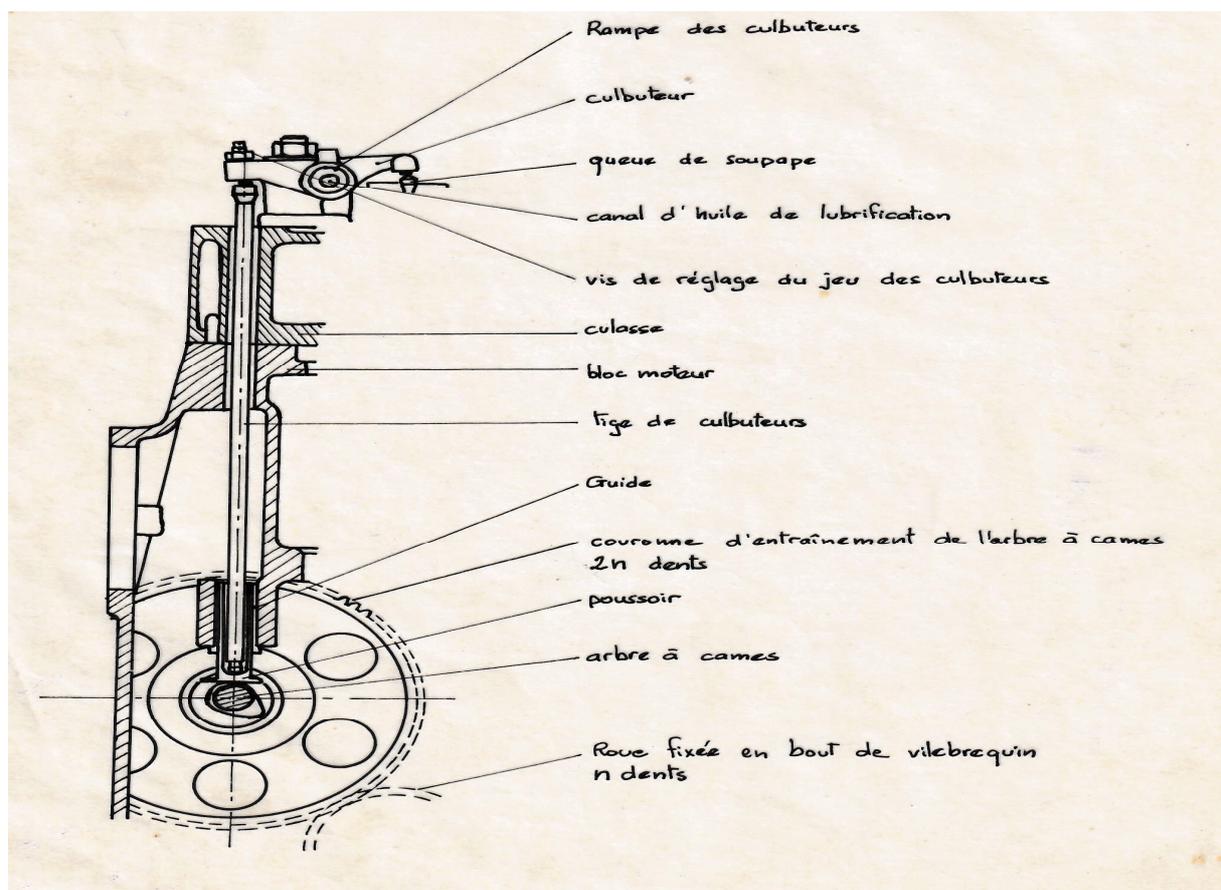


Figure V.2- Montage de soupapes et arbre à cames

### I- Arbre à cames

C'est un arbre entraîné par le vilebrequin et sur lequel sont usinées les cames  
prov

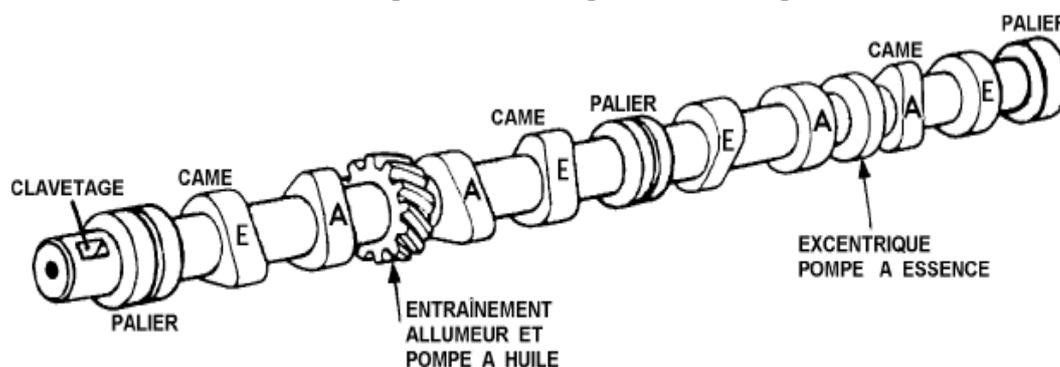


Figure V.3- Description de l'arbre à cames

#### 1- L'entraînement

Sur les moteurs 4T, un cycle dure 2 tours du moteur. Chaque soupape devra s'ouvrir et se fermer une fois tous les deux tours. L'arbre à came devra tourner à  $\frac{1}{2}$  vitesse du moteur.

La liaison avec le vilebrequin se fera par :

➤ **Engrenage**

C'est la solution pour les moteurs de moyenne et grande puissance, quand l'effort à transmettre est important.

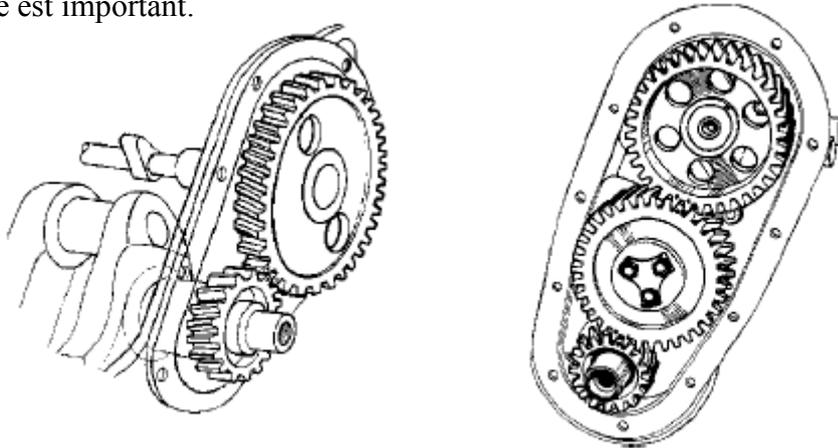


Figure V.4- Entraînement d'arbre à cames par engrenages

➤ **Par chaîne**

Elle est utilisée sur les moteurs de faible puissance. Un tendeur de chaîne doit rattraper l'usure et assurer une tension constante.

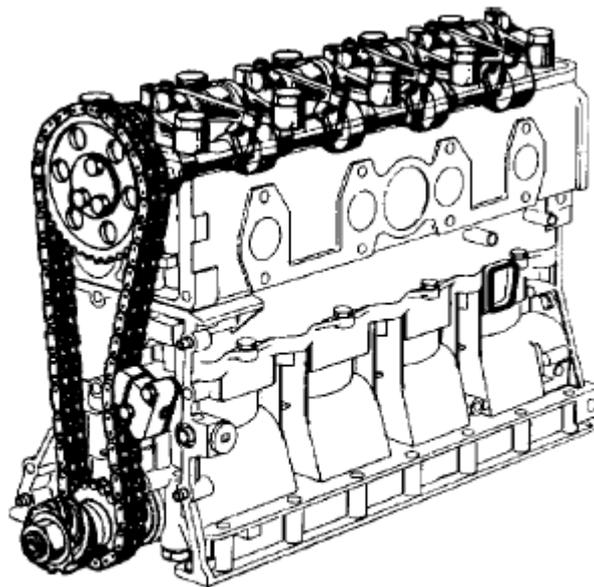


Figure V.5- Entraînement d'arbre à cames par chaîne doublée

➤ **Par courroie crantée**

C'est la transmission moderne pour les petits moteurs rapides. Les pignons sont en alliage léger. L'ensemble a très peu d'inertie.

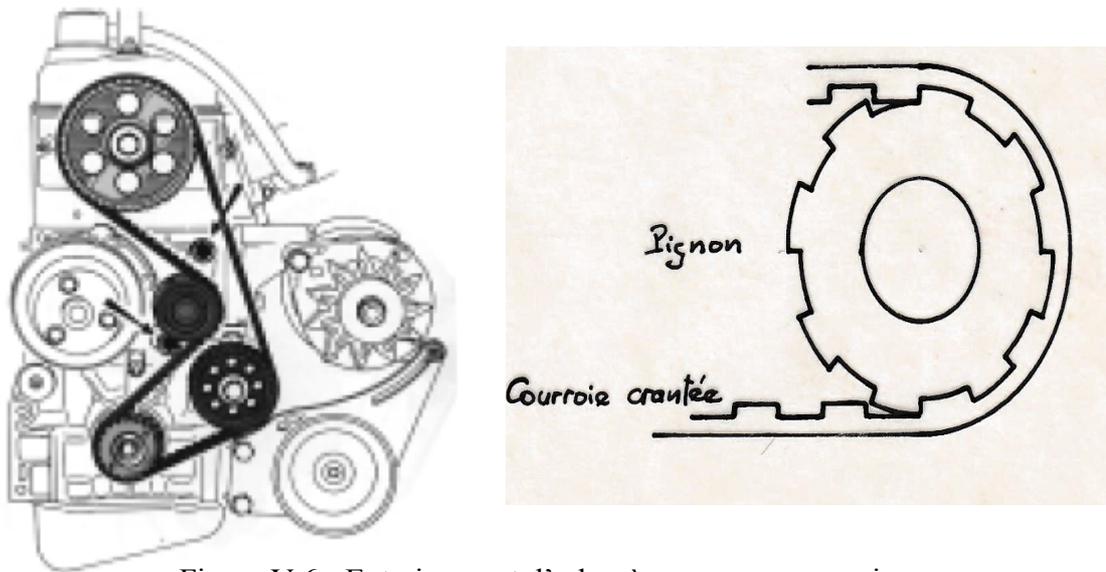


Figure V.6- Entraînement d'arbre à cames par courroie

Pour caler la distribution, c'est-à-dire faire correspondre l'ouverture des soupapes à une position donnée du vilebrequin, on a sur les pignons des repères qu'il faut aligner au montage des pignons.

Sur la plus part des moteurs on ne peut pas régler le diagramme de distribution. La forme de la came est définie par construction et on ne peut décaler le pignon que d'une dent à la fois, ce qui est trop pour un réglage.

## 2- Caractéristiques

L'arbre à cames est forgé en acier ou coulé en fonte. Les cames sont traitées (cémentation, nitruration...) et polies car elles doivent subir de fortes pressions de contact.

L'arbre repose sur de nombreux paliers ( $n+1$  paliers s'il y a  $n$  cylindres) pour que la rigidité soit suffisante. En effet, toute déformation modifie le diagramme de distribution.

Le profil de la came détermine :

- L'instant d'ouverture et de fermeture des soupapes.
- La vitesse du mouvement.

La levée des soupapes doit être à la fois rapide pour que les gaz disposent de la plus grande section de passage dès le début du transfert, et progressif pour que la soupape ne rebondisse pas à l'ouverture et pour limiter les chocs à la fermeture. Le graissage des paliers et des cames doit être abondant car les cames subissent de fortes pressions de contact.

## 3- Détérioration de l'arbre à cames

En cas d'usure ou d'écaillage de surface des cames, du à une mauvaise lubrification, la seule solution est le changement de l'arbre. C'est cependant une avarie peu courante.

## II- Poussoirs – Tiges

Le poussoir commandé par la came coulisse dans un guide. Il sert à absorber la composante horizontale due aux frottements de la came et ne transmettre que la poussée verticale. La partie inférieure du poussoir est généralement plane. Elle comporte quelque fois un galet.

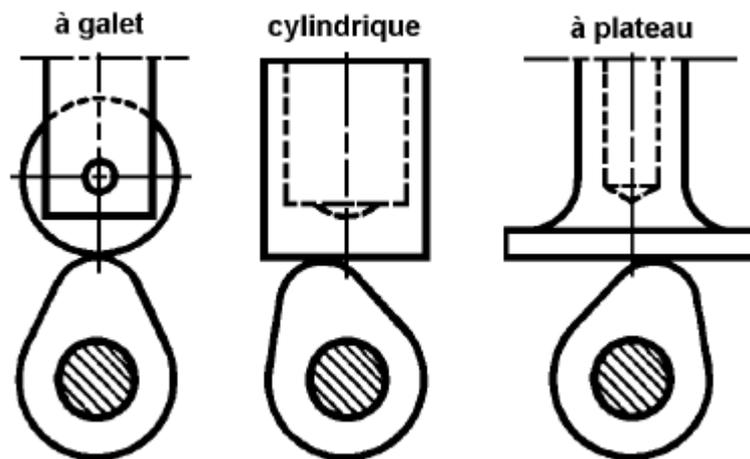


Figure V.7- Différents modes de commande des poussoirs

La tige transmet le mouvement au culbuteur. Sa longueur est un inconvénient. Comme elle se dilate à chaud, il faut prévoir un jeu de fonctionnement à froid d'autant plus grand que la tige est longue. Pour réduire cette longueur, on remonte l'arbre à came le plus haut possible dans le moteur. On est cependant limité par les problèmes d'entraînement de l'arbre à cames.

### III- Culbuteurs

#### 1- Fonctions et caractéristiques

Poussés par la tige, ils pivotent autour de leur axe appelé rampe de culbuteurs et appuient sur la queue de soupape pour l'ouvrir. Quand le nez de la came est passé, la tige redescend. La soupape ramenée en position fermée par ressort, repousse le culbuteur.

Le culbuteur a généralement la forme d'un simple levier mais il doit être très rigide. Sur les moteurs à quatre soupapes par cylindre, on peut commander deux soupapes avec le même culbuteur.

#### 2- Jeux et réglages

L'ensemble des pièces de la distribution sont en contact deux à deux pendant l'ouverture des soupapes. Si on veut qu'elles se ferment complètement, il faut qu'il existe un jeu de fonctionnement.

Pour que la commande soit directe, et éviter les chocs et le fonctionnement bruyant, le jeu doit être le plus faible possible. Cependant il faut tenir compte de la dilatation des organes, surtout des tiges et des queues de soupapes et prévoir un jeu de fonctionnement

suffisamment important à froid pour que la soupape ne reste pas ouverte à chaud. Il est de l'ordre de 15/100 à l'admission et 20/100 à l'échappement sur les moteurs automobiles. Il augmente avec la dimension de la tige.

Le réglage du jeu doit se faire quand le poussoir ne touche pas le nez de la came, soupape fermée.

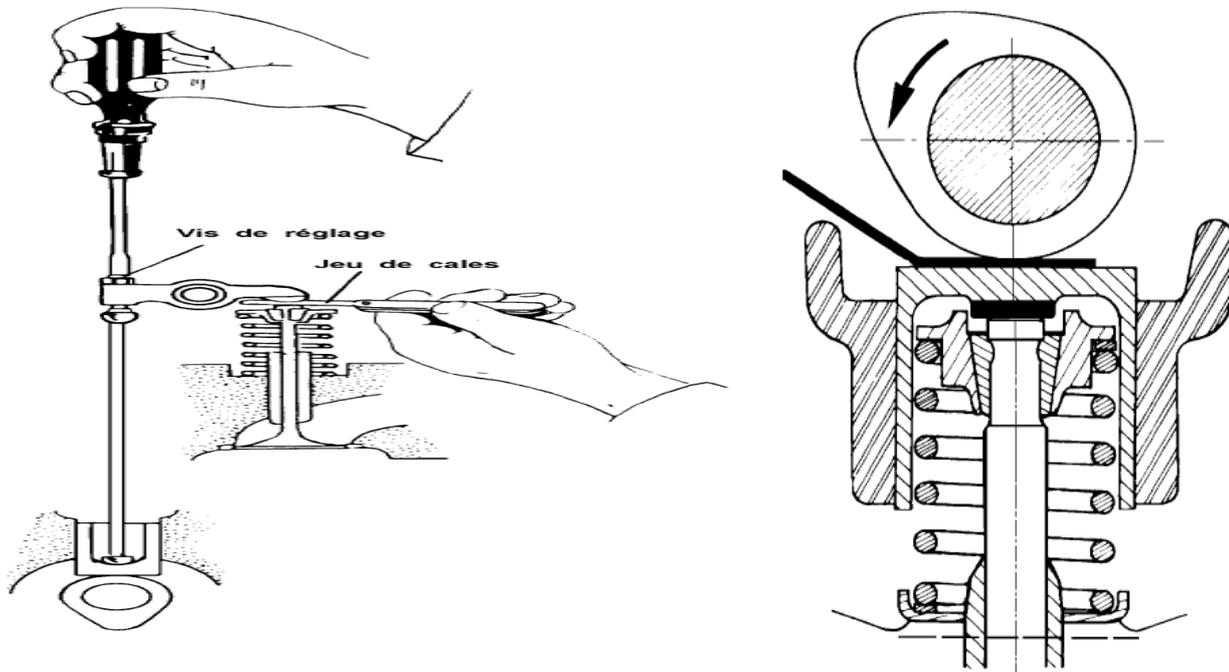


Figure V.8- Réglage des culbuteurs et arbre à came avec les soupapes

**Exemple :**

Réglage des culbuteurs d'un moteur à quatre temps quatre cylindres en ligne.

L'ordre d'allumage est 1, 3, 4, 2. Les cylindres 1 et 4 sont donc décalés d'un tour du vilebrequin.

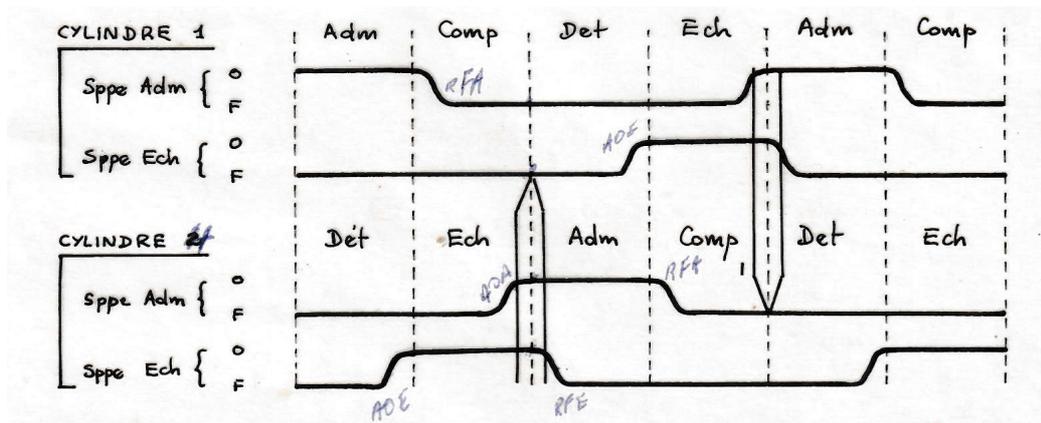


Figure V.9- Positions des soupapes des cylindres 1 et 4 lors du cycle

Pour être certain que, sur le cylindre 1, les deux soupapes soient fermées, donc les poussoirs ne touchent pas le nez de la came, il suffit de virer le moteur jusqu'à ce que les soupapes du cylindre 4 soient ouvertes en même temps. On dit que les soupapes sont en

balance. Une fois le réglage du cylindre 1 effectué, on ramène les culbuteurs du cylindre 1 en balance, pour les jeux des culbuteurs du cylindre 4.

Enfin on utilisera le même procédé pour les cylindres 3 et 4.

## IV- Soupapes

### 1- Fonctions et caractéristiques

Les soupapes ont pour rôle d'ouvrir ou de fermer les orifices de passage des gaz dans le cylindre. Elles doivent être légères mais résistantes, conserver ces qualités à haute température (la soupape d'échappement peut atteindre 750 °C en son point le plus chaud) et être bien protégées contre la corrosion. On utilise des aciers fortement alliés (nickel, chrome..).

#### ➤ Tête

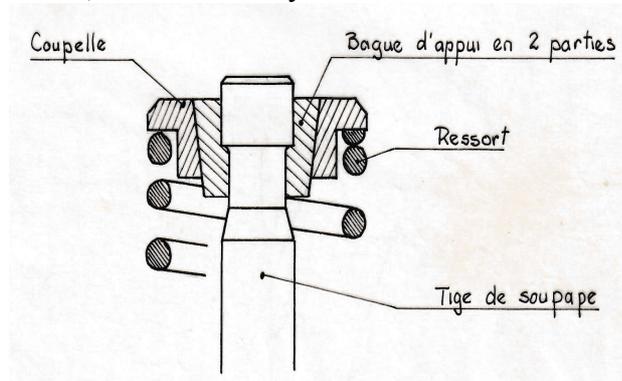
Pour qu'elle résiste à la pression de combustion, on lui donne une forme en tulipe. La portée est conique pour assurer l'étanchéité (cône à 90°, ou à 120° si on veut un meilleur passage des gaz) et quelque fois durcie en surface si l'on veut éviter l'usure.

#### ➤ Tige de soupape

Elle assure le guidage en translation de la soupape. On la réalise quelque fois en acier moins fortement allié que la tête, pour pouvoir tremper la queue, dans ce cas les deux parties sont soudées. La lubrification de la tige est très importante ; le jeu entre tige et guide doit être très faible pour limiter la consommation d'huile. De plus, si l'huile arrive jusqu'aux parties très chaudes de la soupape, elle sera carbonisée et provoquera le gommage de la soupape.

#### ➤ Queue

C'est là que ce fait le contact avec le culbuteur ; c'est pourquoi, pour éviter l'usure, la queue est trempée. Là aussi, se trouve le système de fixation du ressort qui maintient la soupape fermée.



### 2- Sièges de soupapes

C'est la partie de la culasse sur laquelle vient s'appuyer la tête de soupape pour réaliser l'étanchéité. Le matériau de la culasse n'a en général pas les qualités suffisantes pour

résister à des contacts répétés à hautes températures sans s'user. On utilise des sièges rapportés montés après refroidissement à l'azote liquide.

### 3- Guide de soupape

C'est un tube en fonte ou en bronze, qui guide la soupape en translation. Il est monté à force et son diamètre est repris après montage.

### 4- Ressort

Il maintient la soupape en position fermée et doit être assez fort pour vaincre les efforts d'inertie s'opposant à la fermeture de la soupape. Lorsque le moteur est assez gros on peut monter deux ressorts concentriques. En cas de cassure de l'un d'eux, on évite la destruction immédiate de la soupape et du piston correspondant.

## V- Lubrification

Il est important de lubrifier les nombreux contacts entre les différentes pièces de la distribution. L'huile est amenée sous pression dans la rampe de culbuteurs qui est creuse ; elle lubrifie l'axe et le ressort par un perçage sur le haut du culbuteur ; ensuite elle ruisselle vers la queue de soupape et le guide d'un côté, vers la tige de culbuteur, le poussoir et la came de l'autre.

## VI- Dispositions particulières

Nous avons vu la disposition classique pour un moteur en ligne, avec l'arbre à cames en bas du carter. Dans les moteurs en V on peut monter l'arbre à cames au centre du V, un seul arbre à cames est suffisant pour les deux rangées de cylindres. On a cherché à diminuer le nombre de pièces en mouvement alternatifs en montant l'arbre à cames au dessus des soupapes. On parlera d'arbre à cames en tête (ACT).



Cette solution s'impose pour les moteurs tournant très vite, mais présente un défaut ; l'arbre à cames est loin du vilebrequin et difficile à entraîner. Une solution intermédiaire consiste à placer l'arbre aussi haut que possible dans le bloc, les tiges sont plus courtes.

# Les circuits

## I- La suralimentation

- 1- But de la suralimentation
- 2- Principe
- 3- Turbocompresseur

## II- Le Refroidissement

- 1- Problème posé - Analyse
  - a- Origine de la chaleur
  - b- Conséquences d'un manque de refroidissement
  - c- Conséquences d'un refroidissement trop important
  - d- Finalités du système
- 2- Refroidissement par air
  - a- Avantages
  - b- Inconvénients
- 3- Refroidissement par eau
  - a- Par Thermosiphon
  - b- Par Pompe
  - c- Ancienne solution technologique
  - d- Nouvelle solution technologique
  - e- Bouchon du vase d'expansion
  - f- Régulation de la température
  - g- Pompe à eau
  - h- Radiateur
  - i- Liquide de refroidissement

## III- La Lubrification

- 1- Nécessité du graissage
- 2- Caractéristiques des huiles
- 3- classification des huiles

**4- Systèmes de lubrification**

**5- Filtre à l'huile**

# Les circuits

## I- Suralimentation

### 1- But de la suralimentation

Lorsqu'on veut augmenter la puissance d'un moteur, il faut augmenter la quantité de combustible brûlé, et donc la quantité d'air consommée par la combustion. Pour cela il y a 3 moyens :

- Augmenter la vitesse de rotation pour brûler plus de combustible par seconde. Mais on atteint vite la limite imposée par la tenue mécanique des organes.
- Augmenter la cylindrée. Mais on augmente en même temps le poids et l'encombrement du moteur.
- Forcer l'air à rentrer en quantité plus importante dans le moteur. C'est ce que réalise la suralimentation.

De plus, la suralimentation était obligatoire pour les moteurs d'avions, lorsqu'on construisait d'avions à moteurs à piston, devant monter assez haut, en altitude l'air devient moins dense, et pour conserver la puissance du moteur, il fallait forcer un volume d'air plus important à pénétrer dans moteur.

### 2- Principe

Dans un moteur non suralimenté, l'air ou le mélange air-essence est simplement aspiré par le piston quand celui-ci descend. Dans un moteur suralimenté, l'air est d'abord mis sous pression par un compresseur, puis pénètre dans le cylindre sous l'effet de celle-ci dès que la soupape d'admission s'ouvre.

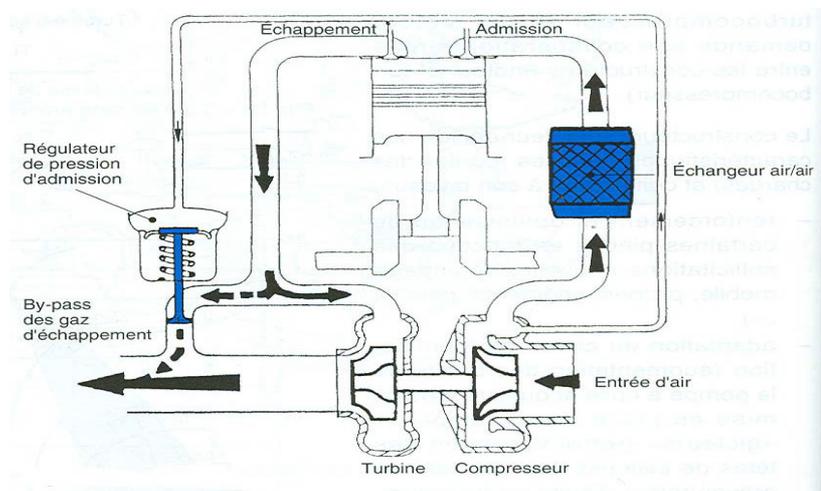


Figure VI.1- Circuit de suralimentation

L'air est comprimé deux fois dans le compresseur d'abord, puis dans le moteur pendant le temps de compression. Cette double compression pose deux sortes de problèmes.

➤ **Problèmes mécaniques**

En fin de compression, juste avant la combustion, l'air est à une pression plus élevée qu'elle ne l'était dans un moteur non suralimenté. La combustion augmente encore cette pression. Les efforts qu'elle exerce sur, le piston, la bielle et le vilebrequin sont très importants ; il faut que les pièces puissent la supporter.

➤ **Problèmes thermiques**

Quand on comprime l'air, on augmente sa température. Un moteur suralimenté fonctionnera avec des températures de gaz plus élevées que sur un moteur non suralimenté. Il faut que les matériaux pour le piston et les soupapes puissent les supporter. La culasse et les chemises doivent être bien refroidies.

Ce problème thermique est plus difficile à résoudre. On est souvent obligé de refroidir l'air sortant du compresseur avant de l'introduire dans le moteur pour éviter d'atteindre des température très élevées en fin de combustion.

Deux systèmes essentiellement ont été utilisés pour réaliser la compression de l'air :

➤ Compresseur entraîné mécaniquement par le vilebrequin du moteur. Cette solution a été abandonnée au profit de la suivante.

➤ Compresseur entraînée par une turbine mue par les gaz d'échappement. Au lieu de laisser les gaz d'échappement se perdre dans l'atmosphère, on les utilise dans une turbine qui fournit nécessaire au compresseur, puissance qu'on a plus besoin de prélever au vilebrequin.

### **3- Turbocompresseur**

La turbine entraînée par les gaz d'échappement et le compresseur sont réunis en une même machine appelée **Turbocompresseur**. Un arbre unique reçoit la turbine à une extrémité d'un arbre et le compresseur à l'autre. La turbine peut être axiale ou centripète, le compresseur peut être axial ou centrifuge, toutes les combinaisons peuvent être rencontrées.

L'arbre est quelques fois supporté par des roulements. Mais comme la vitesse de rotation est très élevée (30000 tr/mn), on préfère la solution des paliers lisses, il faut prévoir une arrivée d'huile sous pression fournie par le moteur ou un pompe supplémentaire.

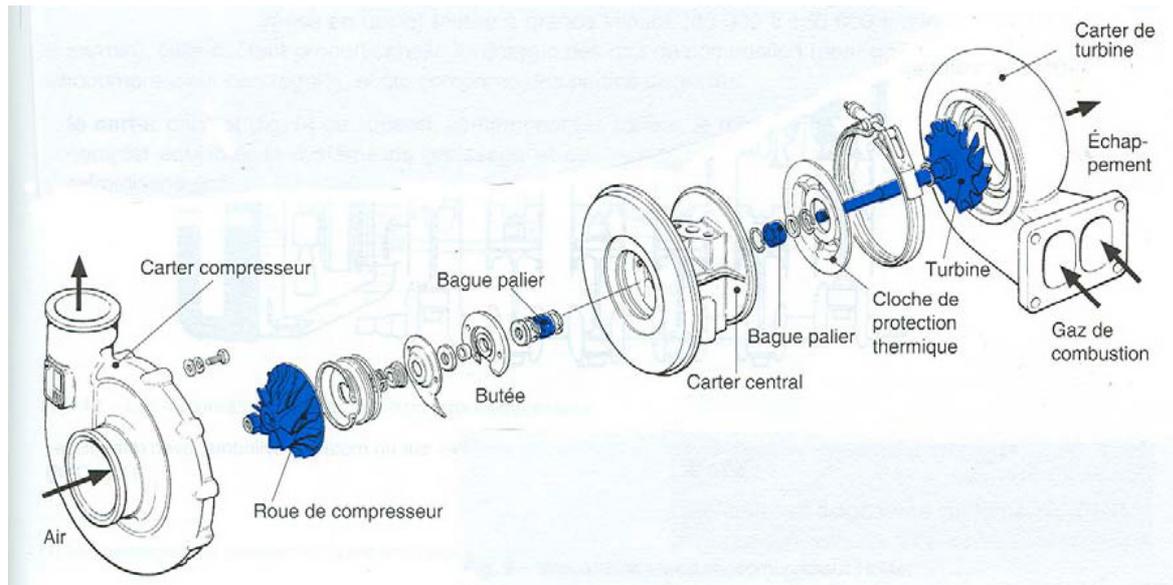


Figure VI.2- Eléments du turbocompresseur

## II- Refroidissement

La combustion s'effectue à des températures de l'ordre de 2000 °C, et lors de l'échappement les gaz sont encore à des températures élevées (800 °C). Le refroidissement a pour but d'empêcher les organes mécaniques d'atteindre des températures trop élevées. Pour cela il faut :

- Eviter la création de points chauds dans la culasse (auto allumage) pour les moteurs à essence.
- Eviter les dilatations exagérées et inégales (déformation, jeu et fissures).
- Maintenir l'huile à des températures pas trop élevées pour qu'elle garde une viscosité suffisante.

Le refroidissement doit donc agir sur :

- Culasse
  - Soupapes
  - Cylindres
- } Refroidissement par air ou par eau

- Pistons
  - Paliers
  - Têtes de bielle
  - Arbre à cames
- } Refroidissement par conduction  
et par circulation d'huile

## 1- Problème posé – Analyse

### a- Origine de la chaleur

- Combustion des gaz dans le cylindre et la chambre de combustion (2000°C).
- Frottement des pièces en mouvement.

### b- Conséquences d'un manque de refroidissement

- Dilatation des pièces >>> Serrage, grippage...
- Dilatation des gaz >>> Diminution du taux de remplissage.
- T° élevée des gaz >>> Auto-inflammation.
- Modification des matériaux >>> Usure voire casse d'organes.
- Altération du lubrifiant >>> Carbonisation, calamine, graissage peu performant.

### c- Conséquences d'un refroidissement trop important

- Combustion lente et incomplète >>> perte de puissance, pollution et surconsommation.
- Condensation du carburant >>> Surconsommation.
- Condensation eau de l'huile >>> Oxydation.
- Essence liquide sur les parois >>> Dilution de l'huile : graissage défectueux.

### d- Finalités du système

Le système de refroidissement permet :

- une montée en température rapide.
- un maintien de la température idéale au bon fonctionnement.
- l'évacuation des calories excédentaires.

## 2- Refroidissement par air

La chaleur absorbée par les parois est cédée à l'air ambiant en contact directe avec la surface extérieure du cylindre et de la culasse.

L'action de l'air dépend de :

- La quantité d'air passant sur les parois et de la température de cet air.
- L'étendue de la surface de refroidissement et de l'état de cette surface.

La quantité d'air à prévoir est de 80 m<sup>3</sup>/ ch.h à 15 °C. Il augmente la quantité si l'air est plus chaud.

Pour augmenter la quantité la surface de refroidissement, il faut munir d'ailettes les parois extérieures du moteur. L'ailette est d'autant plus efficace qu'elle est plus large. On

placera donc des ailettes plus longues au voisinage de la culasse là où a lieu le dégagement de chaleur.

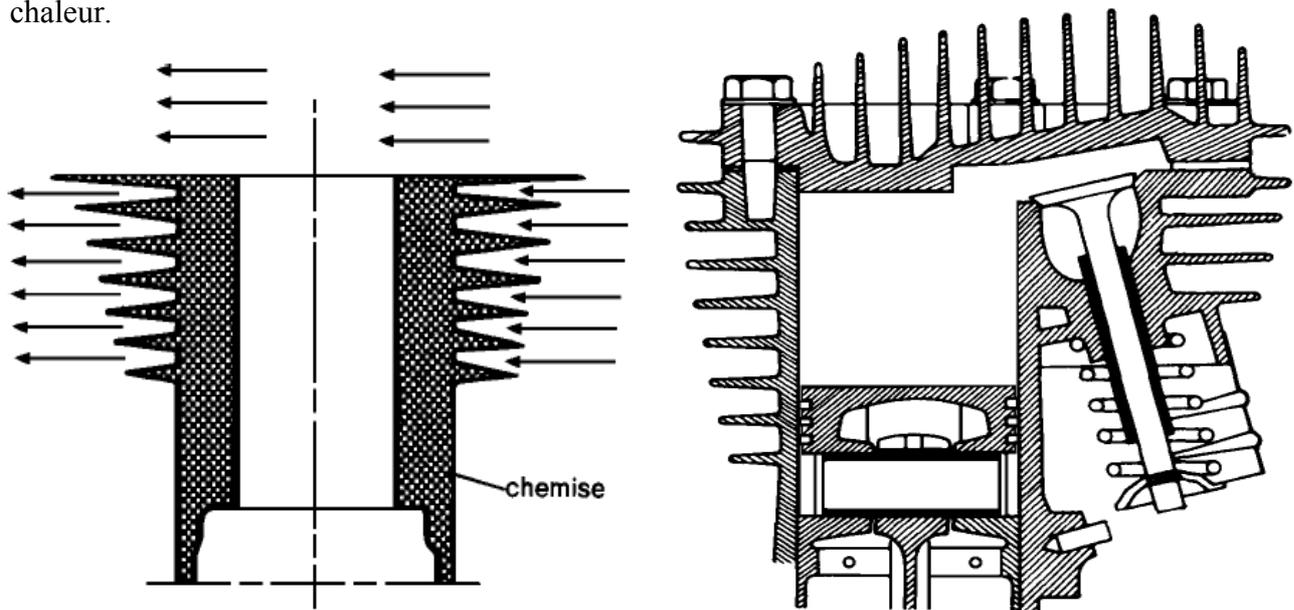


Figure VI.3- Paroi extérieure ailettée du moteur

Dans certains petits moteurs (motocyclettes), c'est le déplacement du véhicule qui crée le courant d'air. Pour les moteurs plus puissants (automobiles), on rajoute un ventilateur forçant l'air dans un carénage entourant le moteur

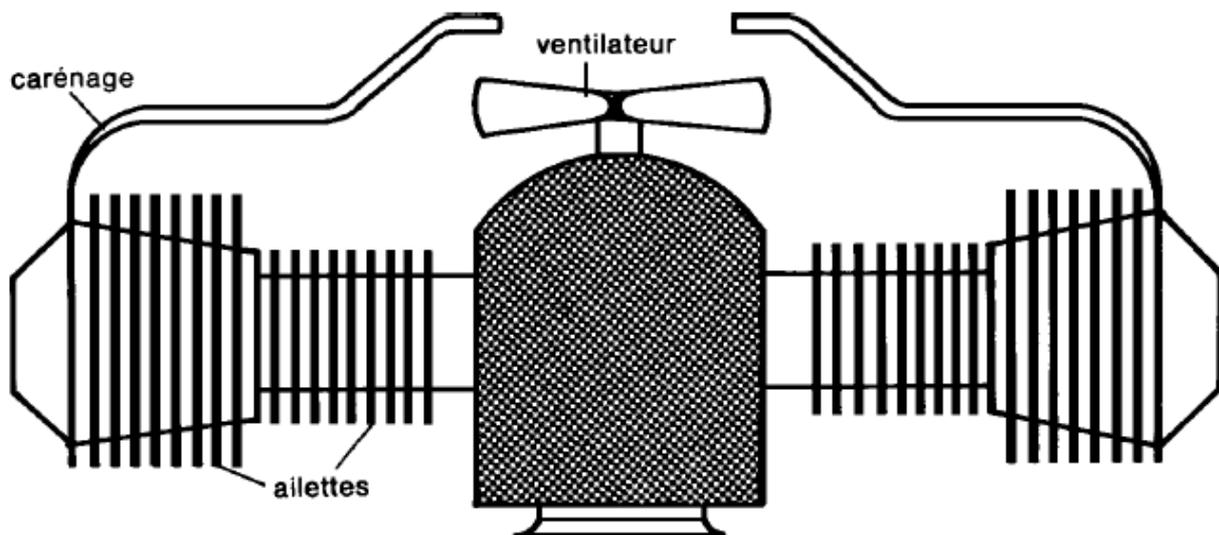


Figure VI. 4- Système de refroidissement à air du moteur

#### a- Avantages

- Simplicité et faible cout de construction.
- Gain de poids.
- Peu de défaillances et d'entretien

#### b- Inconvénients

- Régulation de température imprécise.

- Température moyenne élevée donc moins bon remplissage.
- Rendement, puissance et consommation moins favorable.
- Pollution moins maîtrisée.

### 3- Refroidissement par eau

Dans le refroidissement par circulation d'eau, les cylindres sont munis d'une enveloppe entourant la chambre de combustion et la partie du cylindre en contact avec les gaz chauds. Entre cette enveloppe et les cylindres circule l'eau qui constitue la chemise d'eau. Elle s'échauffe au contact des parois chaudes et sortant de la culasse, est amenée par un tuyau vers le radiateur où elle cède sa chaleur à l'air ambiant. L'eau a une capacité calorifique élevée (environ 6 fois celle de l'air) et peut emmagasiner une grande quantité de chaleur. La quantité d'eau et sa vitesse doivent être calculées pour que l'eau ne soit pas portée à ébullition. On peut diminuer ce risque en mettant le circuit sous pression.

La circulation de l'eau peut être obtenue de deux façons :

#### a- Par Thermosiphon

Le courant d'eau s'établit par différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide. Ce système n'est évidemment plus compatible avec les moteurs actuels.

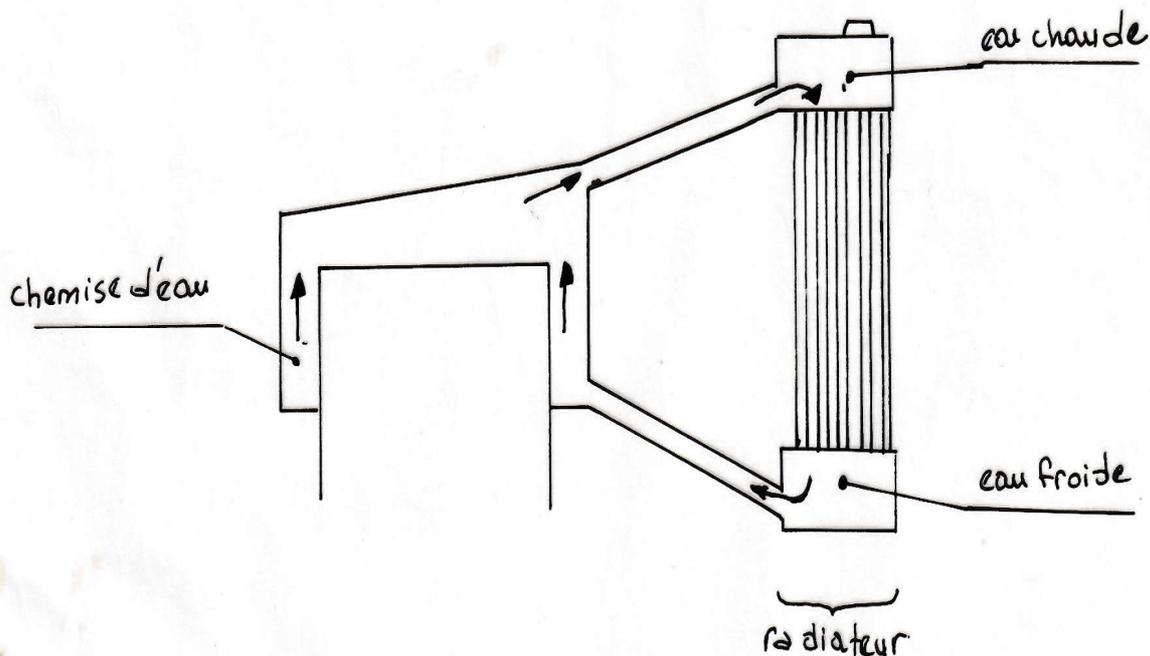


Figure VI.5- Système de refroidissement par thermosiphon

- **Avantages** : Pas de pompe, existence d'une circulation au ralenti.
- **Inconvénients** : Quantité d'eau importante, niveau à surveiller.

### b- Par Pompe

C'est une pompe entraînée par le moteur qui force l'eau à circuler. Il faut veiller à monter la pompe au point le plus bas pour qu'elle soit toujours amorcée.

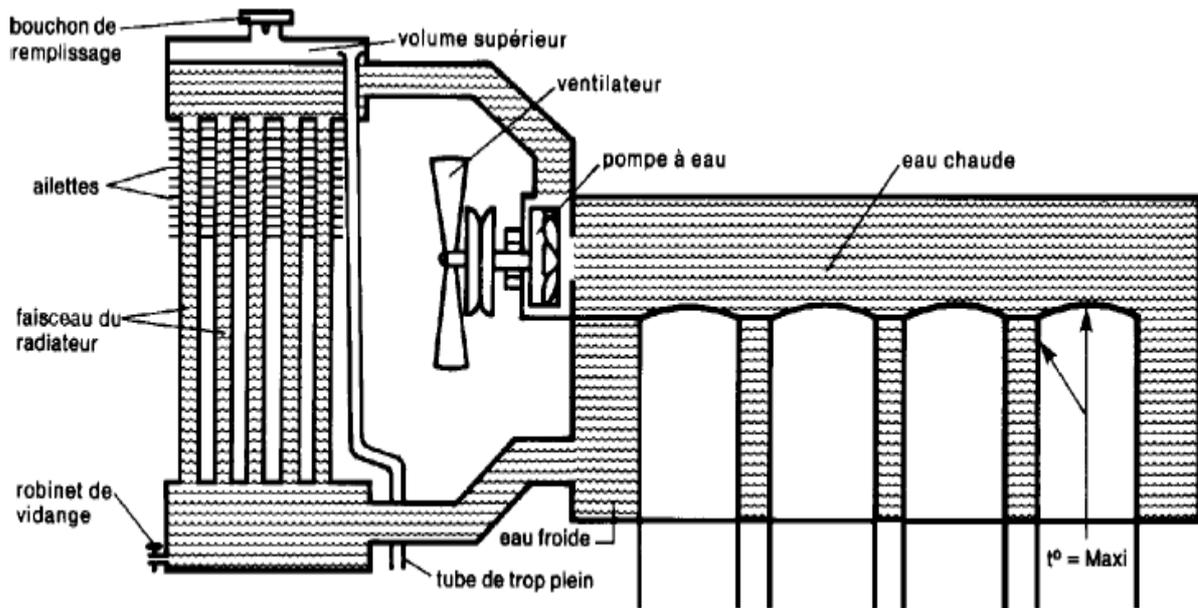


Figure VI.6- Système de refroidissement par pompe

### c- Ancienne solution technologique

La pression est maintenue grâce à un bouchon de pression placé sur l'orifice de remplissage de radiateur. Lorsque la température du liquide augmente, celui-ci se dilate. Le bouchon de remplissage du radiateur possède un clapet (3) maintenu par un ressort taré (2). Le clapet ne s'ouvrira qu'à partir d'une certaine pression ( $>P_a$ ). Ainsi il laissera s'échapper le liquide par le tube de trop-plein (4). Ce système obligera à un entretien régulier : il faudra régulièrement refaire le niveau dans le radiateur car le liquide qui a débordé est perdu.

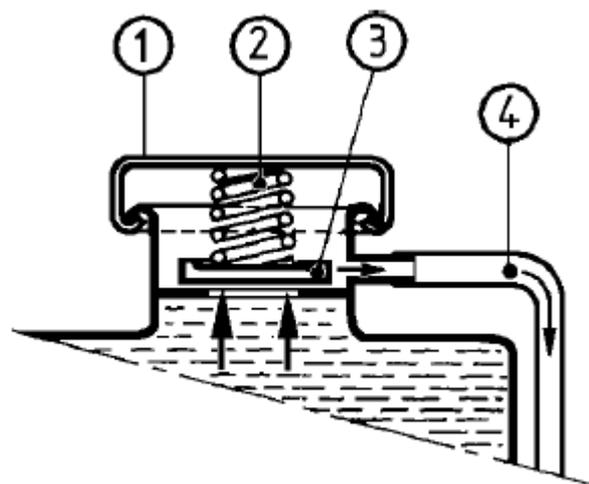


Figure VI.7- bouchon de remplissage du radiateur

#### d- Nouvelle solution technologique « Le circuit scellé »

Le bouchon de pression est placé sur un vase d'expansion, lui-même relié au radiateur. Parfois, le vase d'expansion est intégré au radiateur.

Le vase d'expansion, en communication permanente avec le radiateur, sert à absorber les variations de volume du liquide dues à l'échauffement et au refroidissement du moteur. Ainsi, il maintient un niveau maxi constant dans le radiateur et empêche la consommation de liquide de refroidissement (moins d'entretien et sécurité de fonctionnement).

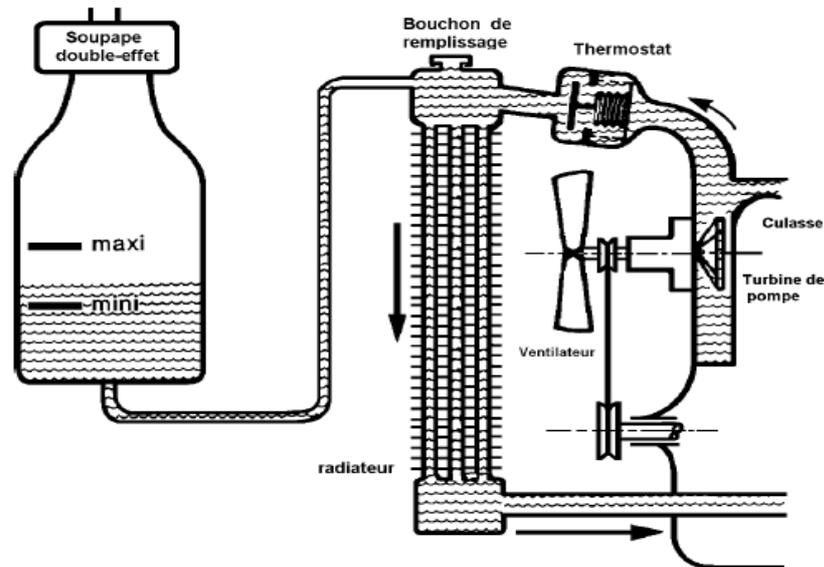


Figure VI.8- Système de refroidissement par pompe

#### e- Bouchon du vase d'expansion

Le clapet de pression ne s'ouvre que si la pression dans le circuit ne dépasse 0.8 à 1.5 bar selon les cas. Le clapet de dépression laisse entrer l'air dans le circuit lors d'une baisse de niveau (refroidissement) lorsque la dépression est d'environ 0,05 bar.

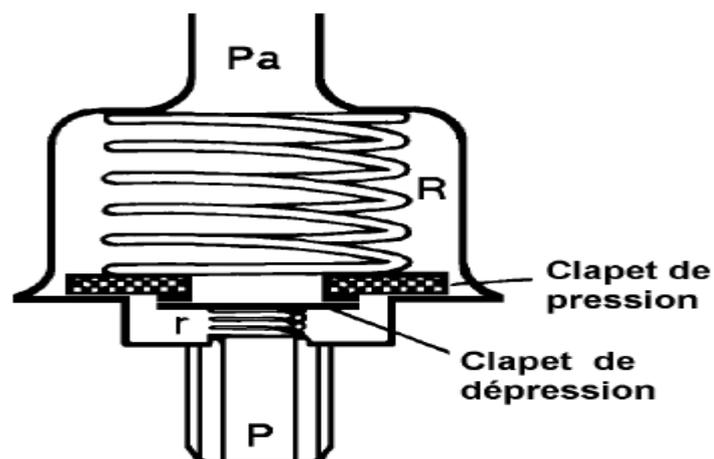


Figure VI.9- Bouchon du vase d'expansion

### f- Régulation de la température

Une mauvaise régulation de la température du moteur entraîne des problèmes de :

- Combustion
- Pollution
- Lubrification

**Moyens utilisés :**

- **Le thermostat ou calorstat**

Lorsque le moteur est froid, le clapet du thermostat est fermé et empêche la circulation d'eau vers le radiateur. Ainsi la montée en température du moteur sera beaucoup plus rapide. Un petit orifice de circulation réduite empêche toutefois la formation de poche d'air. Signalons qu'en général, même lorsque le moteur est froid, le montage particulier du thermostat permet à l'eau de se diriger vers l'aérotherme afin de favoriser au maximum le chauffage de l'habitacle si nécessaire.

Lorsque l'eau est chaude (ex: 85 °C), elle dilate la cire qui ouvre le clapet à la circulation du liquide vers le radiateur qui assurera une évacuation énergétique des calories excédentaires.

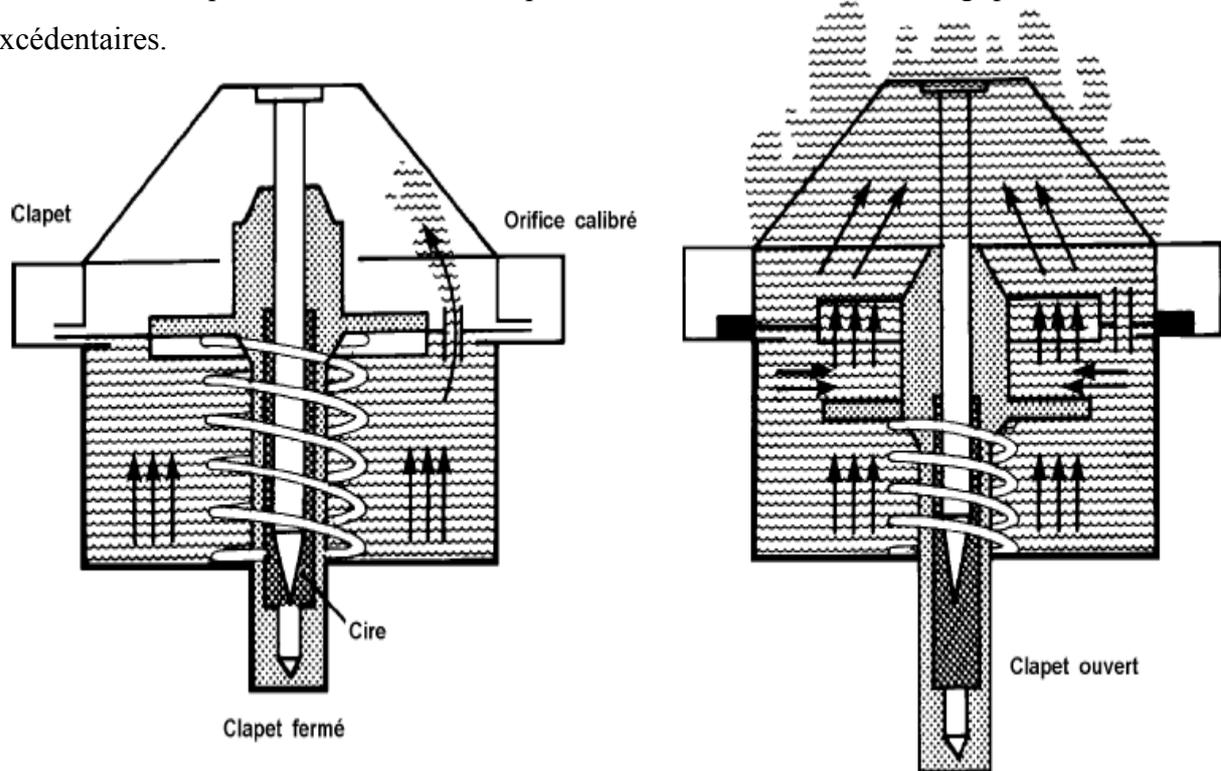


Figure VI.10- Représentation du thermostat

- **Le moto-ventilateur**

La mise en route ou l'arrêt du ventilateur est assuré automatiquement par un thermocontact et un relais.

**Exemple de température de fonctionnement :**

- >>> Enclenchement 1ère vitesse : 96 °C
- >>> Enclenchement 2ème vitesse : 101 °C
- >>> Enclenchement post-ventilation : 105 °C

Certains véhicules ont 2 ventilateurs dont le fonctionnement peut être simultané ou décalé grâce à 2 sondes de t° placées à des hauteurs différentes.

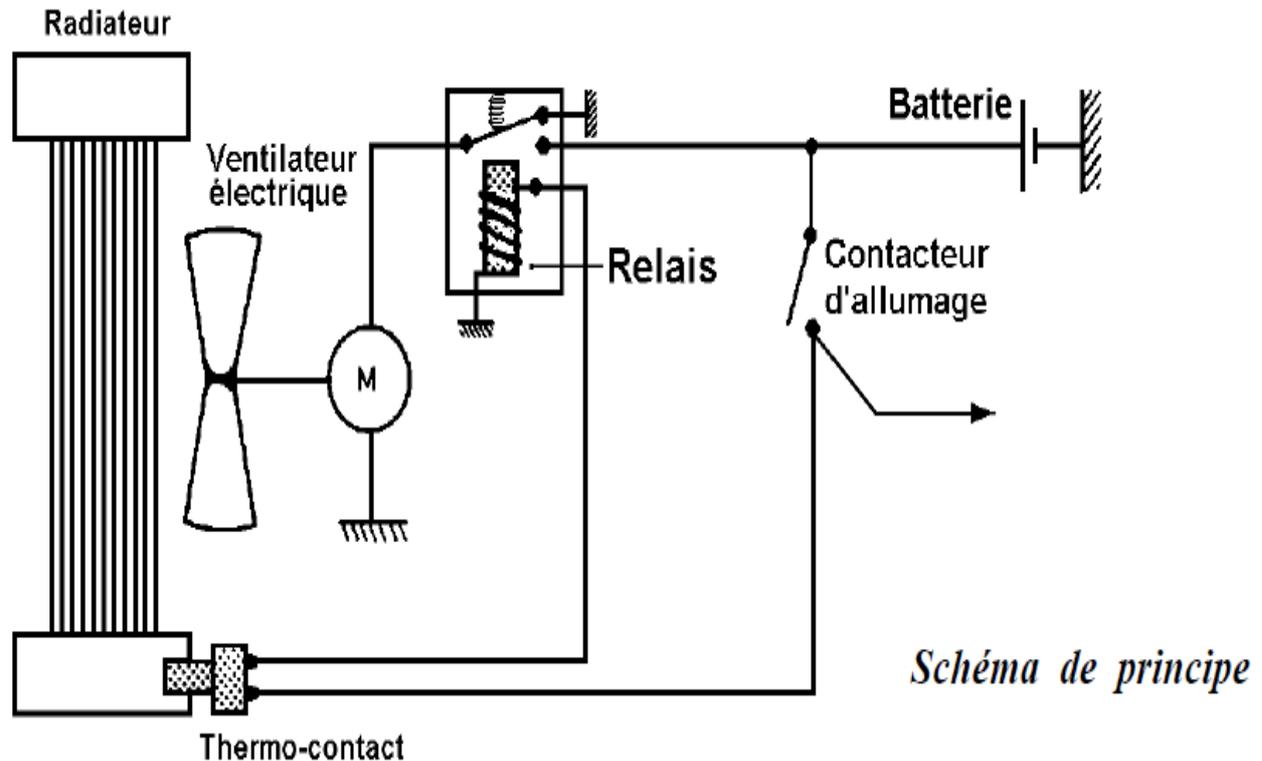


Figure VI.11- Circuit électrique de déclenchement du ventilateur

**Autre solution :**

Le ventilateur débrayable, entraîné par courroie, son mouvement pouvait être solidarisé ou désolidarisé grâce à un électroaimant.

➤ **Organe de sécurité**

Une sonde d'alerte placée sur une partie haute du moteur permet l'allumage du témoin d'alerte du tableau de bord en cas de surchauffe moteur.

Ce type de sonde peut également commander un thermomètre de température d'eau situé au tableau de bord.

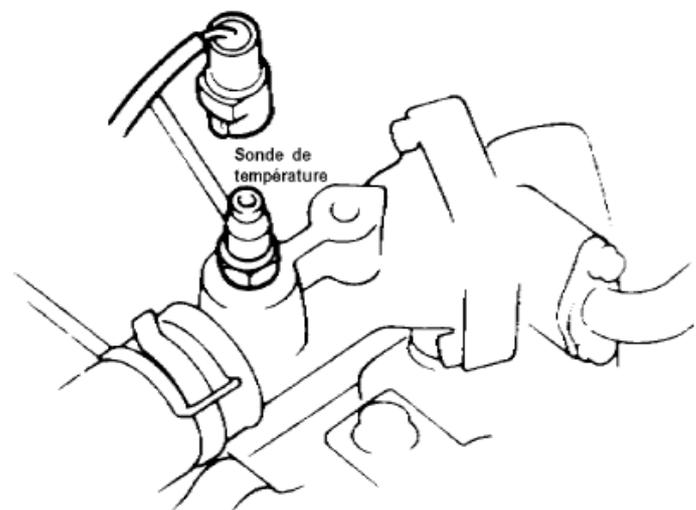


Figure VI.12- Sonde d'alerte

### g- Pompe à eau

La pompe à eau, entraînée par courroie, est généralement de type centrifuge. Sous l'effet de la force centrifuge, l'eau est chassée à la périphérie de la roue, créant ainsi une dépression à l'entrée de la pompe, au centre. L'axe est décentré pour permettre une légère circulation d'eau par thermosiphon après l'arrêt du moteur.

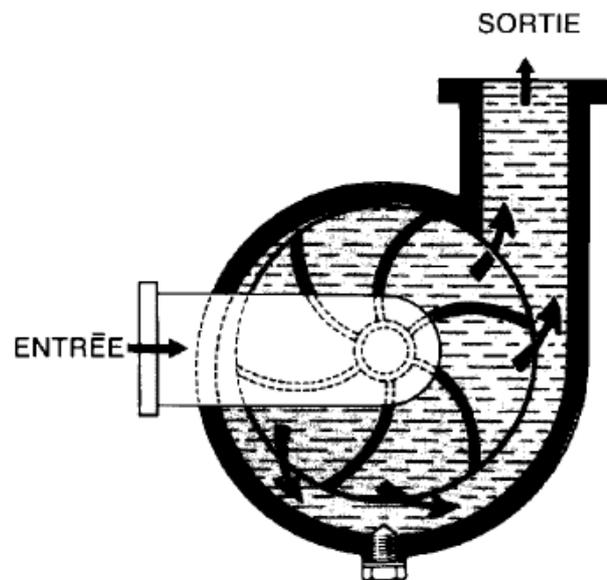


Figure VI.13- Pompe à eau

### h- Le Radiateur

Il est chargé d'évacuer les calories excédentaires dans l'atmosphère. L'eau circule dans un faisceau tubulaire qui est en contact avec des ailettes. Ces ailettes servent à augmenter considérablement la surface d'échange thermique entre l'eau et l'air. La surface frontale du radiateur est un facteur important dans la dissipation de la chaleur.

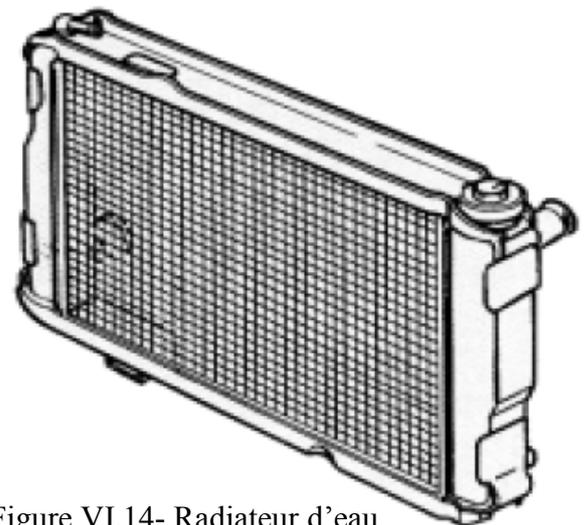


Figure VI.14- Radiateur d'eau

### i- Liquide de refroidissement

**RÔLE** >>> Il est l'agent de transport des calories du moteur vers le radiateur.

**QUANTITÉ** >>> Les moteurs des véhicules de tourisme en contiennent de 5 à 10 litres.

**COMPOSITION** >>> On utilise maintenant des liquides prêts à l'emploi; ils sont fabriqués à base d'ÉTHYLÈNE et de GLYCOL. Ils contiennent également des additifs INHIBITEURS de corrosion.

**QUALITÉS** >>> Protection contre le gel : de - 20 °C à - 35 °C selon la composition.

>>> Ils supportent les températures très élevées.

>>> Ils protègent le circuit des corrosions diverses (métal, plastiques, sels...)

## IV- Lubrification

### 1- Nécessité du graissage

Le frottement de deux surfaces l'une sur l'autre engendre un travail résistant qui se transforme en chaleur et entraîne une perte d'énergie. Le frottement à sec de deux surfaces métalliques peut provoquer en outre un arrachement de métal, puis le grippage. Le graissage est donc nécessaire pour empêcher le contact direct des pièces en mouvement.

On distingue le frottement de glissement, très élevé qui nécessite un graissage soigné (piston dans le cylindre, arbre dans les paliers lisses) et le frottement de roulement, moins sévère, qui se contente d'un graissage plus réduit (engrenages, roulements à billes).

Le système de lubrification a plusieurs rôles :

- diminuer les frottements sur les pièces en mouvement;
- dissiper une partie de la chaleur de combustion;
- assurer l'étanchéité des cylindres;
- évacuer, lors des vidanges, les particules dues à l'usure et aux résidus de combustion.

### 2- Caractéristiques des huiles de lubrification

Les lubrifiants utilisés dans un moteur de véhicule doivent répondre à des conditions de qualité suivantes :

#### a- La viscosité

La viscosité caractérise les forces de frottement qui interviennent entre les molécules d'un fluide seulement quand celles-ci sont en mouvement les unes par rapport aux autres. Elle se mesure de différentes manières. La méthode la plus courante est celle d'Engler.

Cette méthode consiste à comparer la vitesse d'écoulement d'un certain volume d'huile à celle d'écoulement d'un même volume d'eau par un trou de petit diamètre (1 mm, par exemple).

La viscosité de l'huile diminue avec l'élévation de la température. La qualité d'une huile est d'avoir un degré de viscosité suffisant pour assurer un frottement fluide aux températures de fonctionnement des organes du moteur : de 80°C à 150°C.

#### b- L'onctuosité

L'onctuosité est la facilité pour un lubrifiant de bien adhérer aux surfaces métalliques.

#### c- le point d'inflammation

C'est la température à laquelle l'huile émet des vapeurs. Ces vapeurs risquent de s'enflammer. La température d'inflammation est environ : 200°C à 250°C.

**d- Le point de congélation**

C'est la température où l'huile ne s'écoule plus. Elle doit être la plus basse possible. Pour les régions tempérées, cette température est de l'ordre de  $-25^{\circ}\text{C}$  à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

**e- Conductibilité thermique**

Avoir une conductibilité thermique assez élevée pour évacuer rapidement la chaleur.

**f- Désémulsion**

Se désémulsionne facilement, c'est-à-dire se sépare de l'eau et de l'air.

**g- Stabilité**

Avoir une bonne stabilité dans le temps et en fonction de la température.

**h- Inflammabilité**

Ne pas émettre de vapeur inflammable au-dessous d'une certaine limite.

**3- classification des huiles de lubrification**

Les huiles moteur sont classées suivant leur viscosité, les normes de classement sont déterminées par la S.A.E. (Society Automotive Engineering).

On distingue :

Les huiles multigrades dont la viscosité est donnée pour une valeur de la température.

On trouve les huiles SAE 10W, 15W, 20W, 30, 40, 50.

**Exemple 1 :** Une huile classée SAE 10W signifie que :

- 10 indique la valeur de la viscosité,
- W indique que la valeur de la viscosité a été mesurée à la température de  $0^{\circ}\text{F}$  ( $-18^{\circ}\text{C}$ ).

**Exemple 2 :** Une huile classée SAE 40 signifie que :

- 40 indique la valeur de la viscosité,
- l'absence de lettre indique que la valeur de la viscosité est donnée à la température de  $210^{\circ}\text{F}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ).
- une huile SAE 40 est plus visqueuse qu'une huile SAE 30 à la température de  $210^{\circ}\text{F}$ .

Les huiles multigrades dont la viscosité est donnée pour deux valeurs de la température.

On trouve les huiles SAE 10W30, 10W40, 10W50

15W40, 15W50

20W40, 20W50.

**Exemple3:** 15W40

- 15W viscosité à  $0^{\circ}\text{F}$ ,
- 40 viscosité à  $210^{\circ}\text{F}$ .

#### 4- Systèmes de lubrification

Quelques petits moteurs utilisent encore une technique ancienne, le graissage par barbotage. La bielle est équipée d'une cuillère qui vient ramasser l'huile du fond du carter à chaque tour et la projette dans toutes les directions et notamment vers le cylindre.

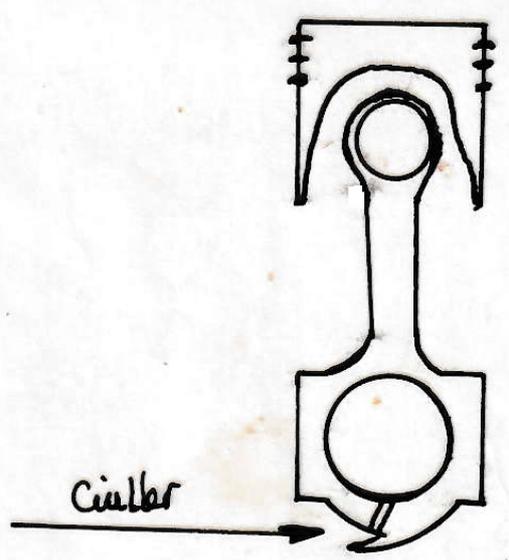


Figure VI.15- Bielle munie de cuillère

Un brouillard d'huile se forme et vient graisser tous les organes du carter. De plus un conduit est percé dans le chapeau de bielle et permet de lubrifier le coussinet de tête de bielle.

Il est souvent efficace de cloisonner le carter pour éviter qu'un côté ne se vide quand le moteur est incliné.

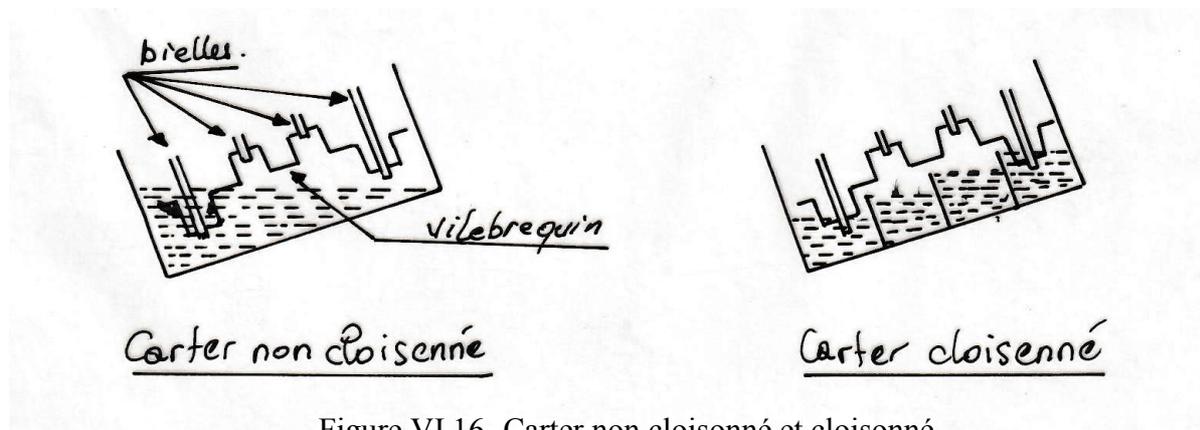


Figure VI.16- Carter non cloisonné et cloisonné

Le système par barbotage est peu performant. On lui préfère le plus souvent le graissage sous pression. Une pompe force l'huile à pénétrer dans le moteur où des conduits sont percés pour amener l'huile vers les pièces à graisser, le vilebrequin est percé pour graisser chaque palier et chaque tourillon ; on perce quelque fois le corps de bielle pour lubrifier l'axe du piston. D'autres conduits dans le moteur permettent de graisser tout le système de distribution. Un conduit peut projeter l'huile sur le piston afin de le refroidir.

Une pompe puise l'huile du fond du carter et l'envoie dans ce système de canalisation. La pompe utilisée est quelquefois à pistons mais le plus souvent à engrenages. Ces pompes sont du type volumétrique, à chaque tour de pompe donc du moteur, un volume déterminé d'huile est envoyé dans le circuit. La pression obtenue dépend de la résistance opposée par le

circuit à la circulation d'huile. Avec une telle pompe, quand le moteur tourne très vite, le débit est important. Un débit plus faible suffirait à satisfaire les conditions de graissage, un débit important rencontre une résistance importante et amène donc à une pression très élevée qui risquerait de détruire la pompe et les canalisations. Pour éviter cette destruction on monte un clapet de décharge à la sortie de la pompe, qui s'ouvre quand une pression de 3 à 5 bars est atteinte. L'huile en excédent retourne vers le carter.

La pompe doit être noyée dans le carter pour être toujours amorcée. On doit placer à son entrée une crépine pour la protéger des grosses particules métalliques pouvant détériorer les pignons.

### 5- Filtre à l'huile

Le circuit de lubrification d'un moteur comprend deux filtres à huile. Le premier, à crépine est situé à l'entrée du tuyau d'aspiration de la pompe pour éviter l'introduction de corps étrangers; le deuxième, à cartouche, est placé de façon accessible sur le bloc-moteur.

La crépine contient un tamis en mailles de 1 mm environ; sa surface est suffisante pour éviter des pertes de charge, même en cas d'obstruction partielle. Elle se trouve au point bas du réservoir ou du carter à huile, aménagé de façon que la crépine soit complètement immergée, malgré les mouvements du liquide.

Le filtre à cartouche se compose d'une embase, et d'une cloche contenant le filtre proprement dit. Le filtre est monté en série au départ du circuit de graissage. Il assure la rétention des particules en suspension dans l'huile, un clapet de sécurité (by-pass) évite l'arrêt du débit d'huile en cas de colmatage du filtre. Le filtre doit être chargé périodiquement ainsi que l'huile.

Le filtre à cartouche se compose d'une embase, et d'une cloche contenant le filtre proprement dit.

Le filtre est monté en série au départ du circuit de graissage. Il assure la rétention des particules en suspension dans l'huile, un clapet de sécurité (by-pass) évite l'arrêt du débit d'huile en cas de colmatage du filtre.

Le filtre doit être chargé périodiquement ainsi que l'huile.

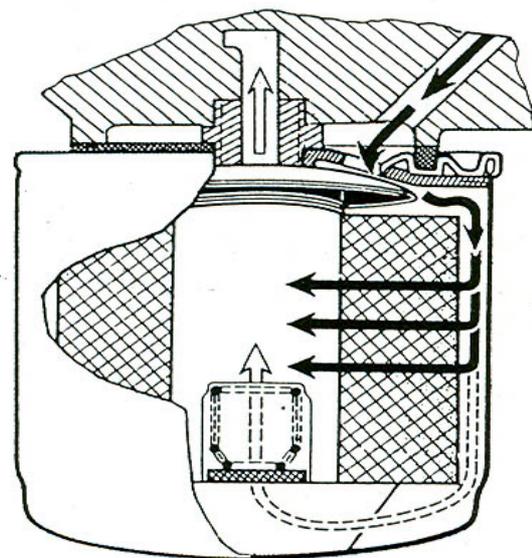


Figure VI.17- Filtre à l'huile

## Supports pédagogiques

- ❖ **M. Menardon, D. Jolivet** ; Les moteurs, Chotard et associés éditeurs 1981.
- ❖ **M. Desbois, Tourancheau, Touache et Torri** ; L'automobile, Moteur à 4 temps et à 2 temps, Tome I&II, Chotard et associés éditeurs 1982.
- ❖ **M. Débois, Armao et B. Vieux** ; Le moteur diesel à 4 Temps et équipements d'injection, Tome III, Chotard et associés éditeurs 1982.
- ❖ **M. Débois, Marié et Martin** ; Techniques de la réparation automobile, Tome I, Chotard et associés éditeurs 1983.
- ❖ **Touache et Torri** ; Equipements et circuits, Edition Foucher, 1983.
- ❖ **L. Mollenhauer, H. Tschoeke** "*Handbook of Diesel Engines*", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- ❖ **J. B. Heywood**, "*Internal Combustion Engine Fundamentals*", Mc Graw-Hill, Inc, 1988.
- ❖ **B. Vieux**, "*Moteurs Diesel technologie générale* ", Editions FOUCHER, Paris, 2003.