

## GENERALITE SUR LES MOTEURS THERMIQUES

### 1. Introduction

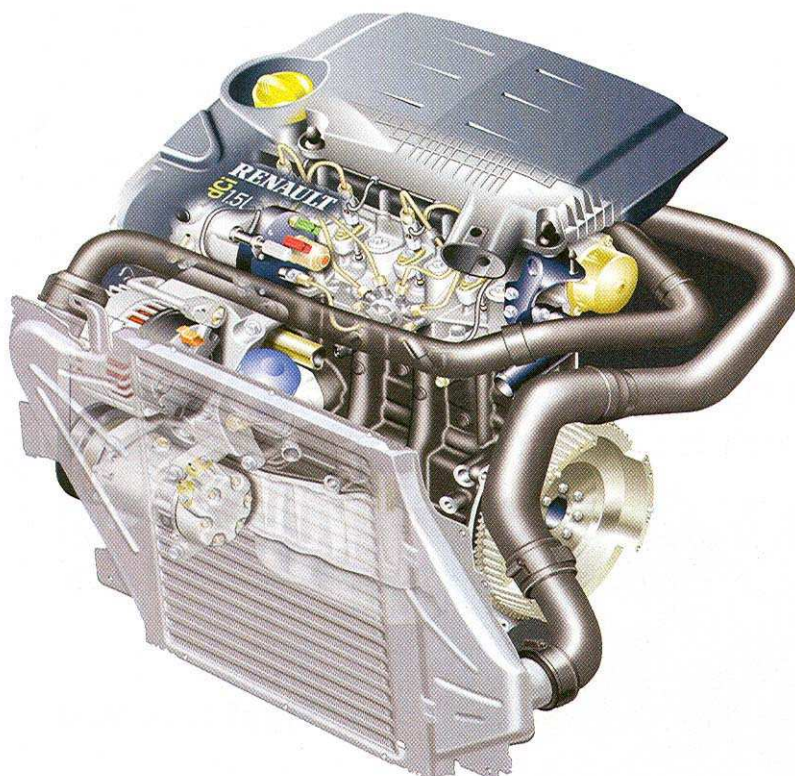
Les moteurs thermiques ont pour rôle de transformer l'énergie thermique à l'énergie mécanique. Ils sont encore appelés les moteurs à combustion qui sont généralement distingués en deux types :

- Les moteurs à combustion interne où le système est renouvelé à chaque cycle. Le système est en contact avec une seule source de chaleur (l'atmosphère).
- Les moteurs à combustion externe où le système (air) est recyclé, sans renouvellement, ce qui nécessite alors 2 sources de chaleur, entrent par exemple dans cette dernière catégorie : les machines à vapeur, le moteur Stirling...

### 2. Moteurs à combustion interne

#### 2.1 Moteurs alternatifs

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre à volume variable et elle est utilisée pour augmenter la pression au sein d'un gaz qui remplit cette chambre (ce gaz est d'ailleurs initialement composé du combustible et du comburant : air). Cette augmentation de pression se traduit par une force exercée sur un piston, force qui transforme le mouvement de translation du piston en mouvement de rotation d'arbre (vilebrequin).



*Fig. 1.1. Moteur Renault 1.5 l dCi*

Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange carburant-air :

- les moteurs à allumage commandé (moteur à essence)
- les moteurs à allumage par compression (moteur Diesel)

Dans les moteurs à allumage commandé, un mélange convenable essence-air, obtenu à l'aide d'un carburateur, est admis dans la chambre de combustion du cylindre où l'inflammation est produite par une étincelle.

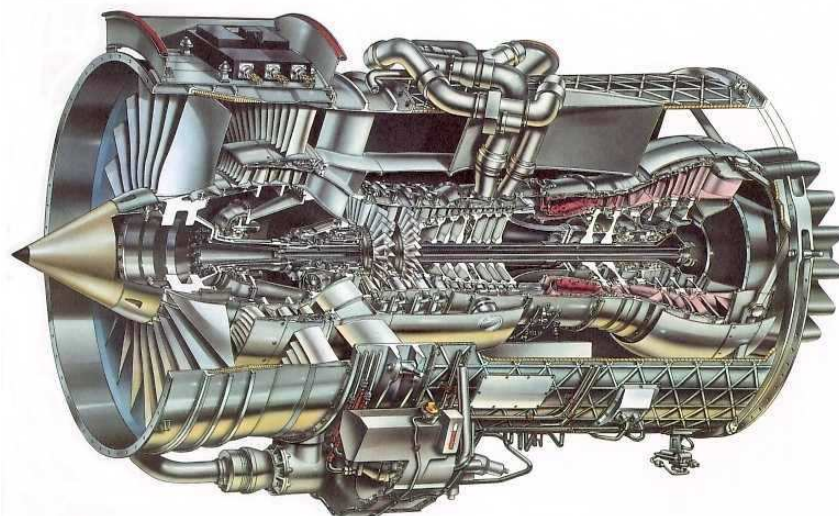
Dans les moteurs à allumage par compression, le carburant est du gazole. On l'injecte sous pression dans la chambre de combustion contenant de l'air, préalablement comprimé et chaud, au contact duquel il s'enflamme spontanément. Ces moteurs sont appelés moteur Diesel.

Les moteurs à allumage commandé et par compression, sont des moteurs à combustion interne, car la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur.

Ces moteurs constituent actuellement la majorité des unités de production de puissance mécanique dans beaucoup de domaines, surtout le domaine de transports où ils se sont particulièrement développés en raison de leurs avantages : bon rendement, compacité, fiabilité... ; ceci explique l'extension qu'on a pris de nos jours l'industrie des moteurs et l'ensemble de ses branches connexes dans tous les pays du monde. Nous traiterons sur ces types de moteurs plus détaillés aux chapitres suivants.

## 2.2. Turbomachines : (turbine à gaz)

Contrairement aux moteurs précédents, les turbomachines sont des machines à écoulement continu. Dans ces dernières machines, les évolutions des fluides moteur ont lieu dans des enceintes successives et juxtaposées, contrairement aux moteurs alternatifs où ces transformations s'opèrent dans le même espace, le cylindre.



*Fig.1.2. Turbomachine*

La chaleur est produite par une combustion dans une chambre de combustion d'un combustible généralement liquide (kérosène par exemple). Cette combustion augmente la pression du gaz (air + combustible). Ce gaz sous pression traverse une chambre de détente à volume constant constituée d'un arbre moteur doté d'ailettes (turbine de détente). De l'énergie est alors fournie à cet arbre sous forme d'un couple moteur qui sera utilisé d'une part vers les consommateurs, d'autre part vers un compresseur (turbine de compression) qui permet la puissance fournie. En effet la pression de l'air augmentant, la masse d'air aspirée augmente, on peut brûler davantage de kérosène, et la puissance disponible est donc augmentée (par rapport à une turbine qui ne disposerait pas d'étage compresseur en entrée).

### 2.3. Moteur WANKEL à piston rotatif

Le moteur rotatif WANKEL est le résultat d'une importante d'étude menée de 1945 à 1954 par l'ingénieur WANKEL sur les différentes solutions de moteur rotatif. En conclusion, il estima que la meilleure était de faire travailler en moteur, le compresseur rotatif réalisé par Bernard Maillard en 1943.



Fig.1.3. Moteur à piston rotatif

#### Avantages :

- Faible encombrement à cylindrée égale à un moteur conventionnel.
- Du fait qu'il ne transforme pas de mouvement linéaire en rotation, il déplace moins de pièces, donc moins d'inertie, ce qui lui permet d'atteindre des régimes très élevés. (En théorie max. 18000 tr/min)
- Moins de pièces permet de faire des montées en régimes très rapide.
- Moins de pièces est égale à moins de poids.
- La plage d'utilisation commence dès les premiers tours et s'étend jusqu'à la rupture.

#### Inconvénients :

- Consommation en essence excessive.
- Frein moteur pratiquement inexistant.
- Techniquement perfectible.

### 3. Moteurs à combustion externe

#### 3.1. Machines à vapeur

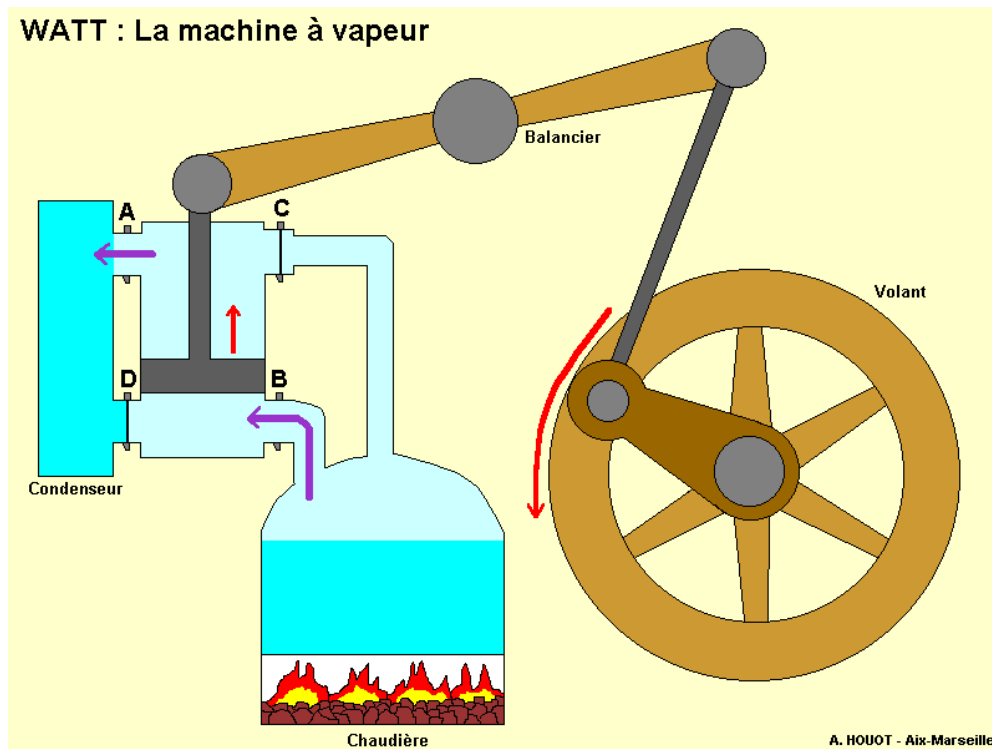


Fig.1.4. Machine à vapeur

La chaleur est produite dans une chambre de combustion (chaudière) séparée de la chambre de détente. Cette chaleur est utilisée pour vaporiser de l'eau. La vapeur d'eau obtenue par cette vaporisation est alors envoyée dans la chambre de détente (cylindre) où elle actionne un piston. Un système bielle manivelle permet alors de récupérer l'énergie mécanique ainsi produite en l'adaptant aux besoins.

L'eau qui est fournie à l'évaporateur est transformée en vapeur d'eau par apport de chaleur. Ce gaz (vapeur d'eau sous pression) est distribué vers le piston où il fournit du travail qui sera utilisé par le système bielle manivelle (non représenté ici). Les distributeurs permettent de mettre chaque face du piston alternativement à l'admission ou à l'échappement.

#### 3.2. Moteurs Stirling

Le moteur Stirling, appelé parfois moteur à combustion externe ou moteur à air chaud est inventé en 1816 dont on reparle de plus en plus aujourd'hui. Le moteur comprend deux pistons A et B et un régénérateur qui absorbe et restitue de la chaleur au cours du cycle. Il existe plusieurs types de moteur Stirling ; pour l'illustration, on ne donne que le schéma d'un moteur alpha (Figure 3).

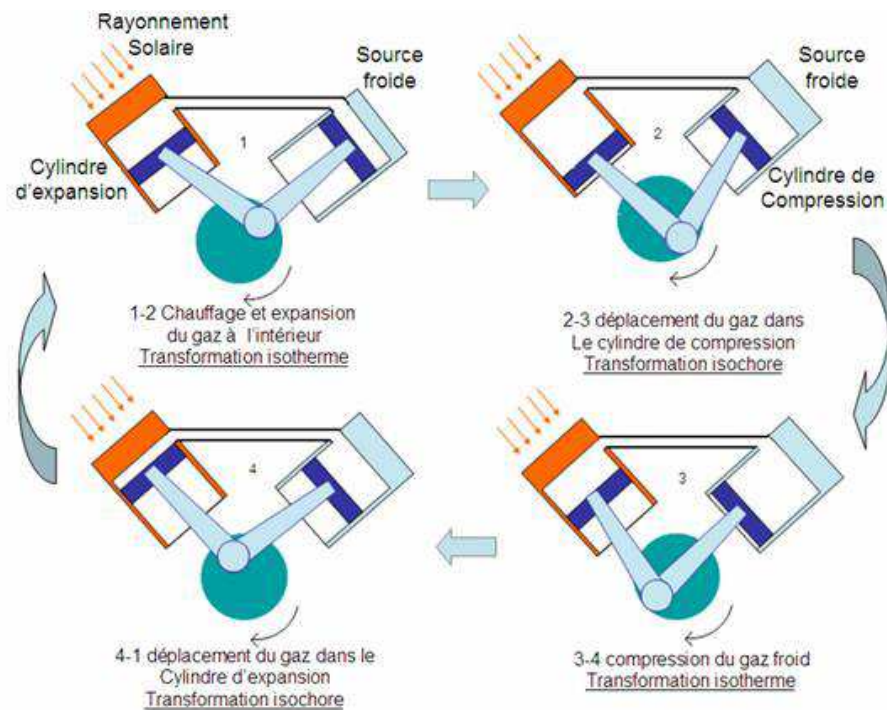


Fig.1.5. Moteur Stirling

#### Avantages :

- Le silence de fonctionnement : il n'y a pas de détente à l'atmosphère comme dans le cas d'un moteur à combustion interne, la combustion est continue à l'extérieur du ou des cylindres. De plus, sa conception est telle que le moteur est facile à l'équilibrer et engendre peu de vibrations.
- Le rendement élevé : fonction, il est vrai, des températures des sources chaudes et froides. Comme il est possible de le faire fonctionner en cogénération (puissance mécanique et calorifique), le rendement global peut être très élevé.
- La multitude de « sources chaudes » possibles : combustible des gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique....
- L'aptitude écologique à répondre le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique. Il est plus facile de réaliser dans ce type de moteur une combustion complète des carburants.
- La fiabilité et la maintenance aisée la relative simplicité technologique permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité et nécessitant peu de maintenance.
- La durée de vie importante du fait de sa « rusticité ».
- Les utilisations très diverses du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaude (du mW au MW).

Inconvénients :

- Le prix : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés. Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté.
- La méconnaissance de ce type de moteur par le grand public. Seuls quelques passionnés en connaissent l'existence.
- La variété des modèles empêche une standardisation et par conséquent une baisse de prix.
- Les problèmes technologiques à résoudre : les problèmes d'étanchéité sont difficiles à résoudre dès qu'on souhaite avoir des pressions de fonctionnement élevées. Le choix du gaz ' idéal', à savoir l'hydrogène pour sa légèreté et sa capacité à absorber les calories, se heurte à sa faculté de diffuser au travers des matériaux. Les échanges de chaleur avec un gaz sont délicats et nécessitent souvent des appareils volumineux.

## FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

### 1. Principe de fonctionnement

#### 1.1. Définition du cycle à 4 temps

On appelle cycle l'ensemble des phases qui se succèdent dans le moteur, dans notre cas le cycle comprend quatre phases ou temps :

- Temps admission : aspiration d'air ou de mélange air-essence.
- Temps compression : de l'air ou du mélange.
- Temps combustion-détente : inflammation rapide du mélange provoquant une brusque montée en pression des gaz puis leur détente.
- Temps échappement : évacuation des gaz brûlés.

On constate que seul le troisième temps fournit de l'énergie, c'est le temps moteur, les trois autres temps sont résistants.

#### 1.2. Déroulement du cycle

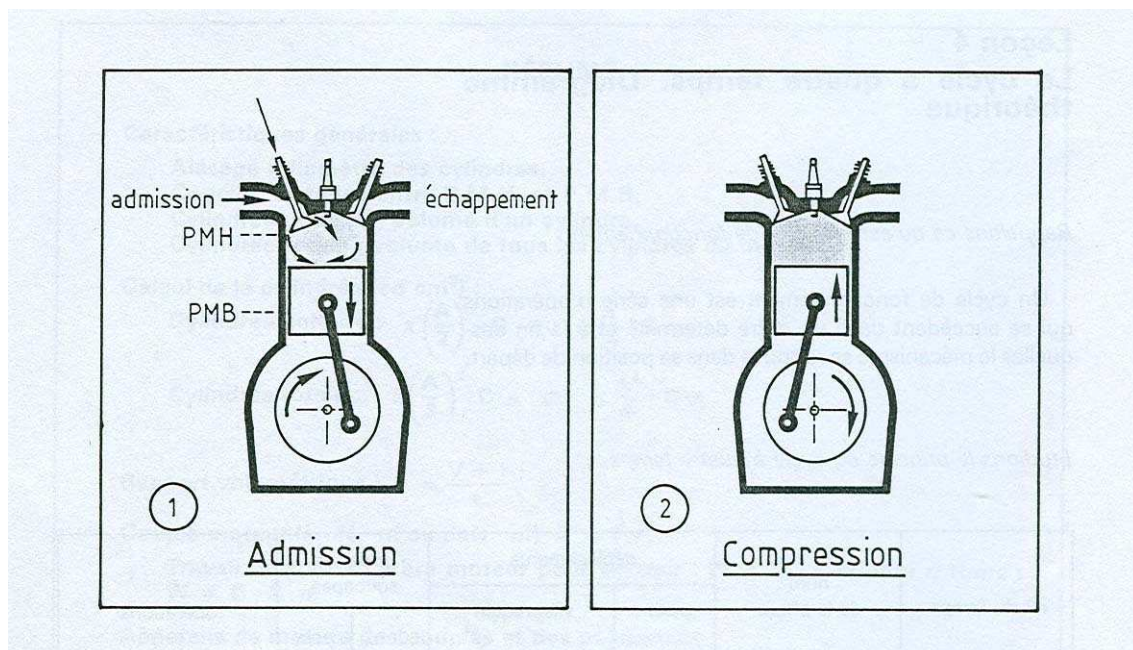


Fig.2.1. Cycle à 4 temps

- 1) Le piston en descendant crée une baisse de pression qui favorise l'aspiration des gaz.
- 2) Le piston comprime les gaz jusqu'à ce qu'ils n'occupent plus que la chambre de combustion (pression + chaleur).

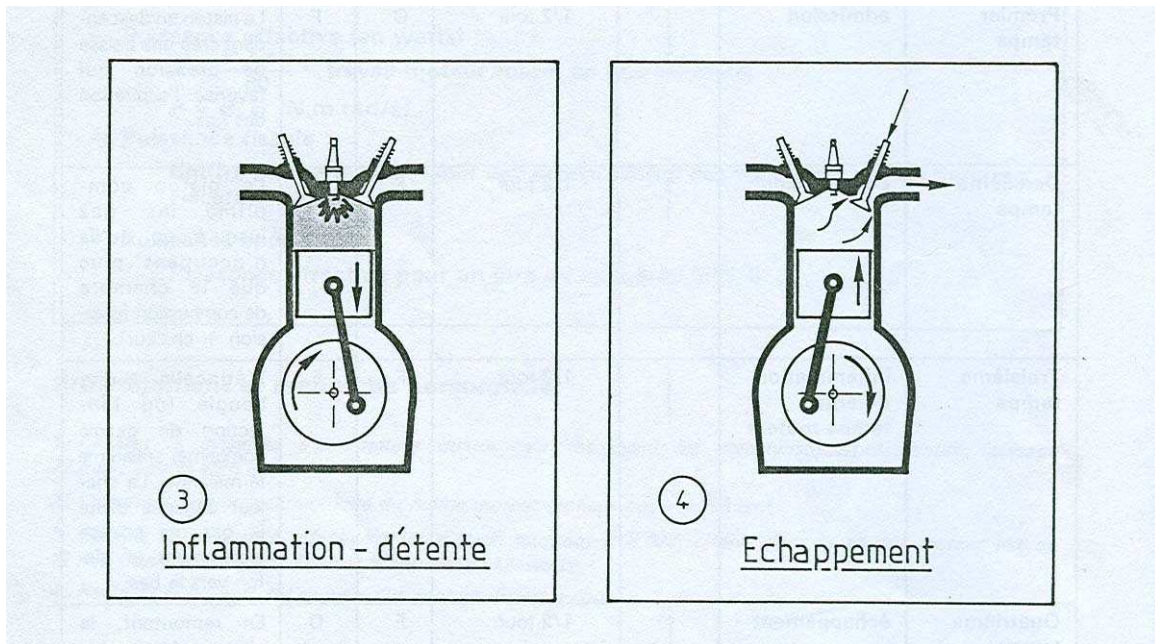


Fig.2.2. Cycle à 4 temps

- 3) L'étincelle d'une bougie (ou l'injection de gazole comprimé) enflamme le mélange. La chaleur dégagée dilate le gaz qui pousse violemment le piston vers le bas.
- 4) En remontant, le piston chasse les gaz brûlés devant lui. A ce moment, le moteur se trouve à nouveau prêt à effectuer le premier temps.

## 2. Caractéristiques d'un moteur

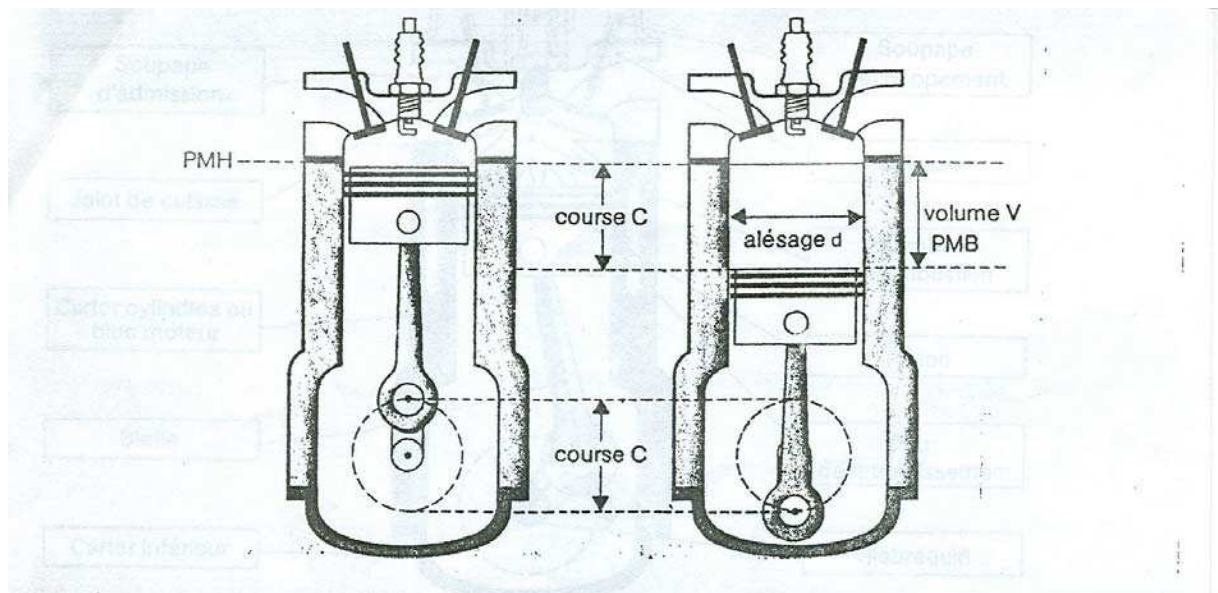


Fig.2.3. Caractéristique d'un moteur

- L'alésage : c'est le diamètre ( $d$ ) du cylindre en millimètre.
- La course : c'est la distance ( $c$ ) parcourue par le piston entre le Point Mort Haut (PMH) et le Point Mort Bas (PMB).

- La cylindrée : la cylindrée unitaire ( $V_u$ ) d'un cylindre c'est le volume balayé par le piston entre le PMH et le PMB.

$$V_u = c \times \frac{\pi d^2}{4}$$

La cylindrée totale ( $V_t$ ) d'un moteur c'est la cylindrée unitaire multipliée par le nombre de cylindres N.

$$V_t = V \cdot n$$

où n- nombre de cylindres.

*Nota* : la cylindrée s'exprime en général en  $\text{cm}^3$ .

- Le rapport volumétrique ( $\rho$ ) : c'est le rapport entre le volume total d'un cylindre ( $V+v$ ) et le volume de la chambre de combustion ( $v$ ).

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

En général on laisse le résultat sous forme de fraction.

*Exemple* : 8.5/1 ; 11:1 ; 18 :1 ; 22/1

*Remarque* :

- Si V croît, v restant constant :  $\rho$  croît.
- Si v croît, V restant constant :  $\rho$  décroît.
- Si  $\rho$  croît, la pression de fin de compression croît.

- Le couple moteur :

La pression qui agit sur la tête de piston lui communique une force d'intensité :

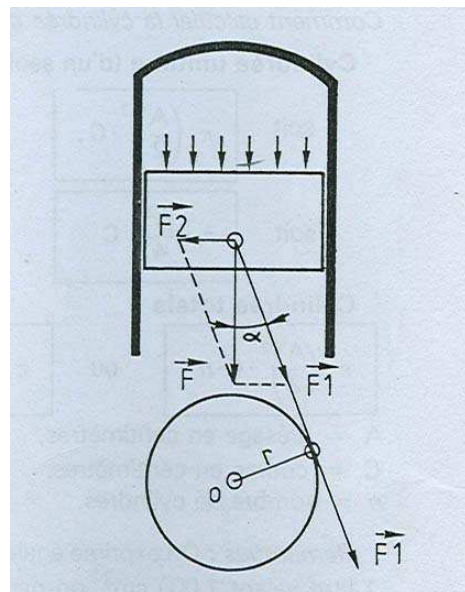
$$F = p \cdot S; \text{ [N]}$$

où : p - la pression de gaz brûlés  
S - l'aire de la tête du piston

Déterminons  $F_1$  sur la bielle :  $F_1 = \frac{F}{\cos \alpha}$

Le moment du couple moteur (ou couple moteur) est donc le produit de la force sur la bielle par la longueur du bras de maneton de vilebrequin.

$$C = F_1 \cdot r; \text{ [Nm]}$$



*Fig.2.4. Décomposition des forces agissant sur le maneton du vilebrequin*

Le travail développé ( $W$ ) est égal au produit de la force sur la bielle ( $F_1$ ) par le déplacement de la force ( $l$ ).

$$W = F_1 \cdot l; \quad [J]$$

Déplacement de la force pour un tour :  $l = 2\pi r$

Travail de force pour un tour :  $W = \vec{F}_1 \cdot 2\pi \cdot \vec{r}$

D'où  $W = C \cdot 2\pi$

Pour un nombre de tours donnés ( $N$ ) le travail sera :

$$W = C \cdot 2\pi N$$

On peut observer que le couple le plus élevé se situe lorsque la bielle et le bras du vilebrequin forment un angle de  $90^\circ$ .

➤ La puissance de moteur : la puissance effective est le travail moteur fourni en une seconde.

Soit pour  $N$  tours par minute :

$$P = \frac{W}{t} = C \cdot \frac{2\pi N}{60} = C \cdot \omega; \quad [W = Nm \cdot s^{-1}]$$

où  $\omega$  - la vitesse angulaire de vilebrequin.

### 3. Analyse fonctionnelle

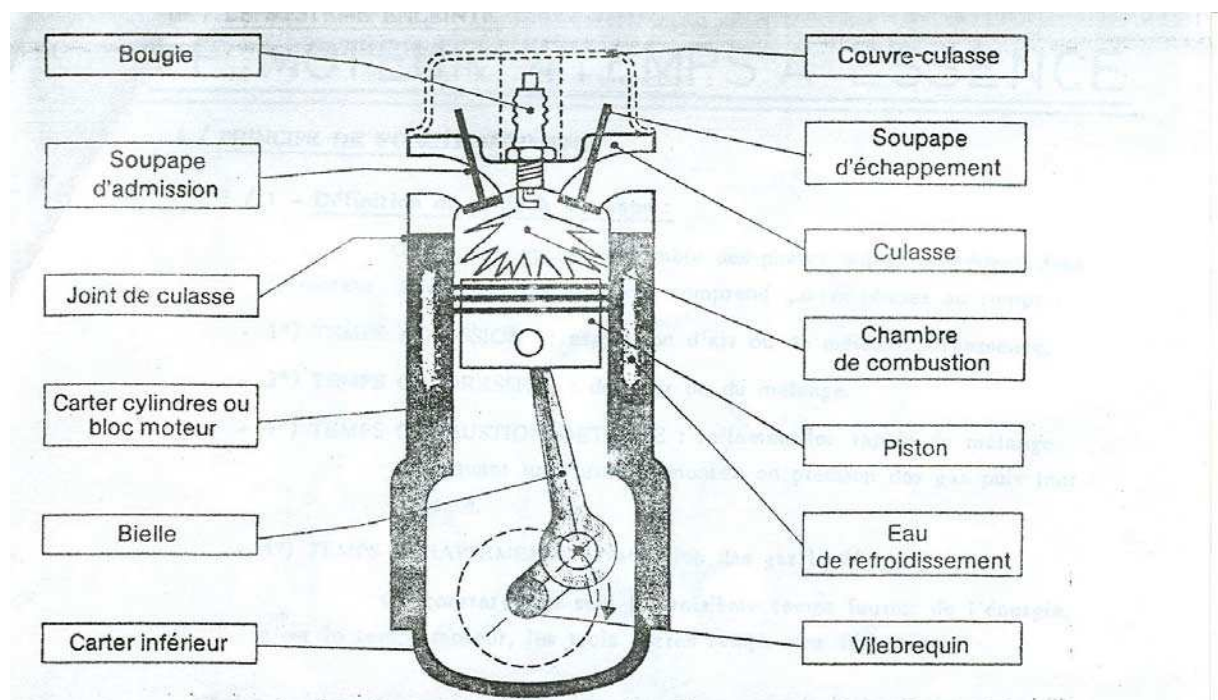


Fig.2.5. Eléments principaux du moteur

Le fonctionnement du moteur thermique est assuré par l'association de quatre grands groupes fonctionnels :

3.1. Les systèmes à fonctions mécaniques

- ❑ Le système enceinte : assure l'isolement de la masse gazeuse.
- ❑ Le système bielle-manivelle : assure la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement de rotation.
- ❑ Le système de distribution : commande l'ouverture et la fermeture des soupapes en temps voulus.

3.2. Le système de carburation :  
assure l'alimentation du moteur en mélange carburé.

3.3. Le système d'allumage :  
assure l'inflammation du mélange carburé.

3.4. Les systèmes auxiliaires :

- ❑ Le système de lubrification
- ❑ Le système de refroidissement
- ❑ Le système de démarrage et de charge (circuit électrique).

## ETUDE THERMODYNAMIQUE DU MOTEUR

### 1. Généralité

Tous les moteurs à combustion font appel aux transformations thermodynamiques d'une masse gazeuse pour passer de l'énergie chimique contenue dans le combustible à l'énergie mécanique directement exploitable sur l'arbre de sortie du moteur.

Cette idée fondamentale a été émise par le physicien français S. Carnot.

Selon le principe de Carnot :

Une machine thermique ne peut produire du travail que si elle possède deux sources de chaleur à des températures différentes :

- La source chaude (à température absolue  $T_2$ ) où a lieu la combustion du carburant.
- La source froide à température  $T_1$  (gaz d'échappement, radiateur, milieu extérieur très proche du moteur).

### 2. Diagramme théorique

Le diagramme théorique d'un moteur à 4 temps est le diagramme idéal. Il ne tient pas compte des facteurs suivants :

- Temps mis par les soupapes à s'ouvrir.
- Délai d'inflammation du mélange.
- Inertie des gaz.
- Echanges de chaleur avec l'extérieur.

Les variations qui se produisent dans le diagramme sont liées aux lois de la thermodynamique (Cycle Beau de Rochas).

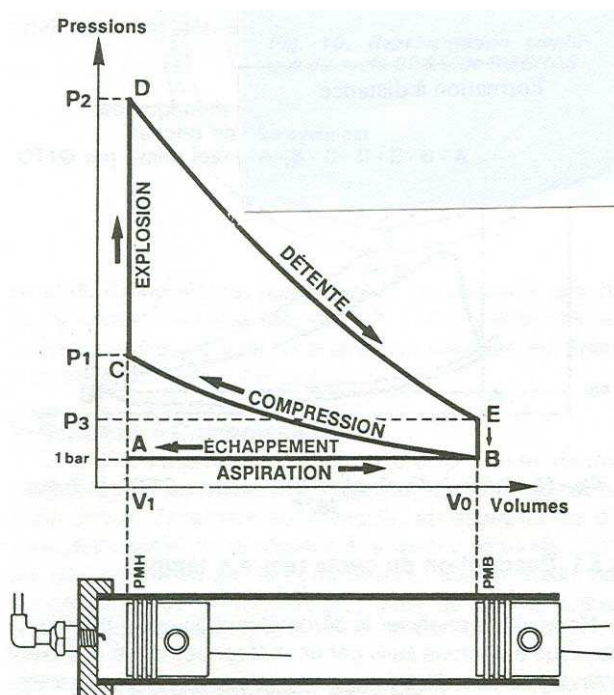


Fig. 3.1. Cycle Beau de Rochas

- Le travail moteur est représenté par l'aire ADEBA.
- Les temps résistants sont représentés par l'aire ABCA.
- Le travail utile - l'aire CDEBC.

- a) Aspiration du gaz à la pression atmosphérique dans le cylindre le long de la droite isobare AB ( $P_0 = 1 \text{ Bar}$ ,  $V_1 V_0$ ).
- b) Compression adiabatique BC jusqu'au volume minimal  $V_1$ , la pression devenant  $p_1$ .
- c) Combustion instantanée du gaz à volume constant le long de la droite isochore CD avec une forte élévation de température à  $T_2$  et de la pression à  $p_2$ .
- d) Détente du gaz chaud le long de l'adiabatique DE qui ramène le volume à  $V_0$ , mais à une pression  $p_3$  supérieure à celle de l'atmosphère.
- e) Ouverture de l'échappement des gaz dont la pression tombe instantanément à la pression atmosphérique le long de l'isochore EB, la température redescendant à  $T_1$ .
- f) Reste à vider le cylindre, des gaz brûlés, en décrivant l'isobare BA, pour revenir au point de départ A.

### 3. Diagramme réel

#### 3.1. Diagramme réel avant réglage (Cycle OTTO)

La première réalisation pratique d'un moteur à piston fonctionnant suivant le cycle à 4 temps a été réussie par OTTO en 1876. Mais le graphique des pressions qu'il releva sur le moteur monocylindrique à piston tournant à 180 tr/min s'écartait assez nettement du cycle théorique de Beau de Rochas; le rendement pratique était inférieur au rendement théorique.

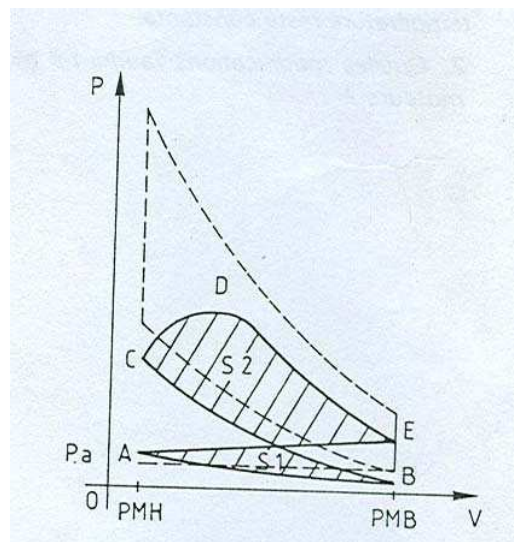


Fig. 3.2 Diagramme réel avant réglage

- Admission (Courbe AB) :  
La pression  $p$  est supérieure à  $p_a$  du fait de l'accumulation des gaz dans la tubulure d'admission, puis le recul rapide du piston crée une baisse de pression dans la deuxième partie de AB.  
 $p_B < p_a$  au point B.

- Compression (Courbe BC) :  
La courbe de compression se trouve en dessous de la courbe théorique, puisque son point de départ B est en dessous de  $p_a$ . Elle est également modifiée par les échanges de chaleur.
- Inflammation-détente (Courbe CDE) :  
Pendant le temps que dure la combustion, le piston recule. La verticale va s'abaisser en une courbe dont la pression maximale sera plus faible.  
De plus, pendant la détente, les gaz chauds perdent une partie de leur chaleur. La pression décroît plus rapidement que dans le moteur théorique.
- Echappement (Courbe EA) :  
La chute de pression se fait progressivement pour n'approcher la pression à l'admission qu'en fin de course piston. Pendant toute la course il règne une contre-pression due à la poussée rapide du piston.

Dans le diagramme réel on voit que les temps utiles perdent une partie de leur surface. Les temps résistants augmentent.

$$S_2 - S_1 = \text{Travail utile insuffisant.}$$

#### Défauts constatés :

- Remplissage insuffisant,
- Compression insuffisante,
- Pression d'explosion trop faible,
- Echappement incomplet (contre-pression).

#### Causes :

- Ecoulement défectueux des gaz : lent et difficile (coudes, soupapes),
- Inflammation non instantanée (durée  $t$ ) des gaz frais en général  $t \leq 0.001$  s.
- Compression et détente non adiabatiques.
- Vitesse  $v$  du piston assez grande.

### 3.2. Diagramme réel après réglage

Il est nécessaire, pour remédier à ces inconvénients d'augmenter le temps d'ouverture des soupapes afin d'éviter le freinage des gaz.

Le point d'allumage devra être avancé pour tenir compte du délai d'inflammation.

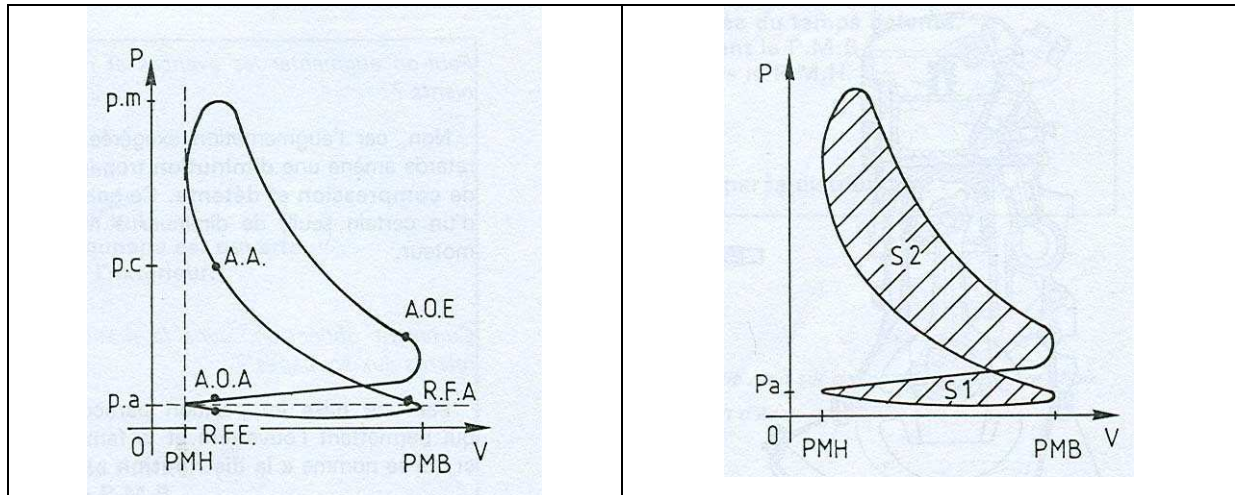


Fig. 3.3. Diagramme réel après réglage

- Avance à l'ouverture de l'admission (AOA) :  
Cette avance évite l'arrêt de la veine gazeuse devant une soupape fermée et améliore ainsi le taux de remplissage.
- Retard à la fermeture de l'admission (RFA) :  
On profite de l'inertie des gaz pour augmenter le remplissage et ne refermer la soupape qu'après le PMB. La diminution du temps de compression est compensée par une pression de début de compression plus élevée.
- Avance à l'allumage (AA) :  
Elle permet de répartir l'explosion de part et d'autre du PMH. La pression maximale se trouve ainsi augmentée.
- Avance à l'ouverture de l'échappement (AOE) :  
Elle permet d'avancer la chute de pression des gaz brûlés afin de limiter leur tendance à la contre-pression.
- Retard à la fermeture de l'échappement (RFE) :  
On profite de l'inertie des gaz pour faciliter leur évacuation complète. La soupape d'échappement se ferme donc au début du temps admission.

En conclusion, l'aire  $S_2$  a augmenté, l'aire  $S_1$  a diminué.  
Le travail utile du moteur est plus important.

## SYSTEME ENCEINTE

### 1. Ensemble bloc-cylindres culasse

#### 1.1. Condition à remplir

L'ensemble bloc-cylindres culasse est un ensemble indéformable qui sert de point d'appui aux éléments mobiles internes et externes et permet la fixation de certains organes externes (démarrage, pompe à eau, alternateur,...).

- Le bloc sert de support au vilebrequin. Il doit résister aux poussées, aux torsions et aux vibrations.
- Le cylindre guide le piston. Il doit résister à la pression, à la chaleur et au frottement.
- La culasse forme la partie supérieure de la chambre de combustion. Elle doit également résister à la pression et à la température élevée.  
L'ensemble doit être d'une bonne conductibilité thermique afin d'évacuer rapidement les calories en excédent.  
(Température des gaz enflammés : 2000° C);  
(Température moyenne du moteur : 110° C).

L'ensemble bloc-cylindre culasse supporte également les organes de distribution, permet le passage des canalisations de lubrification et des conduits de refroidissement.

#### 1.2. Bloc-cylindres (Carter-moteur)

Le bloc est en fonte ou en alliage d'aluminium moulé. Il constitue le bâti du moteur et dont la partie intérieure est usinée pour former les cylindres ou les logements de chemises s'il s'agit d'un moteur à chemises rapportées.

L'eau de refroidissement circule librement à l'intérieur du carter-moteur.

Sa partie supérieure est dressée pour former plan de joint : la culasse vient, en effet, s'appuyer sur le plan de joint supérieur pour coiffer les cylindres.

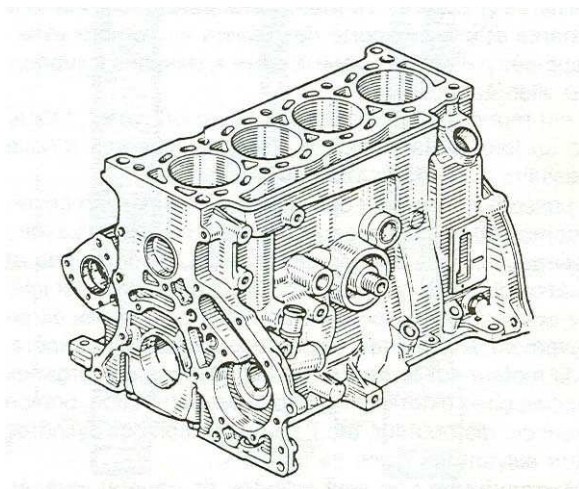


Fig. 4.1. Bloc-cylindres en fonte à l'étain non chemisé

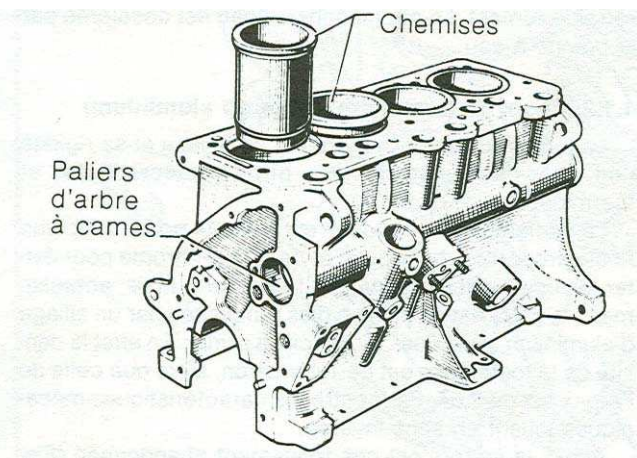


Fig. 4.2. Carter moteur 4 cylindres en fonte à chemises rapportées

### 1.2.1. Types de blocs

a) Bloc à alésage direct

Certains blocs en fonte sont directement alésés, les cylindres et le bloc ne faisant qu'une seule pièce. En cas d'usure des cylindres, il est nécessaire de réaliser à une cote supérieure et d'adapter des pistons de plus fort diamètre.

b) Bloc à chemises amovibles

Ce système facilite la fabrication; il permet l'utilisation de matériaux différents pour le bloc et pour les cylindres (cylindres en fonte, bloc en alliage léger); la réparation est facilitée (remontage de chemises d'origine).

c) Chemises sèches

Fourreau de faible épaisseur emmanché dans un bloc en fonte ou en alliage léger; le remplacement est possible mais l'ajustement est serré; il n'y a aucune communication avec l'eau de refroidissement.

d) Chemises humides

La chemise sert même temps de paroi pour les conduits de refroidissement; leur remplacement est aisé, mais l'étanchéité doit être particulièrement soignée. Les chemises sont en fonte centrifugée, elles sont également alésées, rectifiées et rodées.

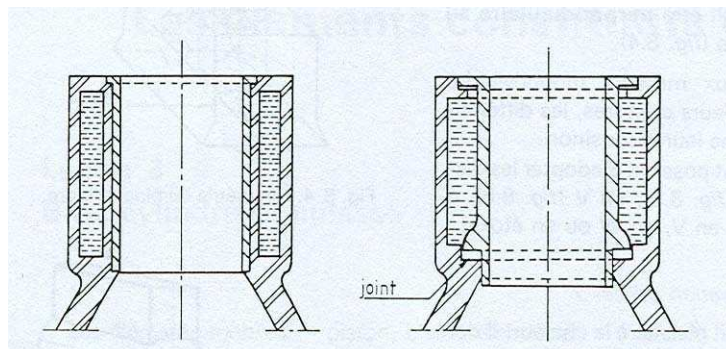


Fig. 4.3. Chemise sèche

Fig. 4.4. Chemise humide

### 1.3. Culasse

La culasse assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion.

Elle permet :

- l'arrivée et l'évacuation des gaz;
- la mise en position des éléments de la distribution et d'une partie de l'allumage;
- l'évacuation rapide des calories, le point le plus chaud du moteur étant précisément la chambre de combustion.

La culasse est aussi en fonte ou en alliage d'aluminium moulé. Les contraintes mécaniques étant moins importantes que pour le bloc-moteur, les constructeurs ont quasiment abandonné la fonte au profit d'aluminium, en raison de sa légèreté et sa très bonne conductibilité thermique.

Un réseau de conduits d'eau et d'huile est pratiqué dans la culasse, l'étanchéité bloc-culasse est assurée par le joint de culasse.

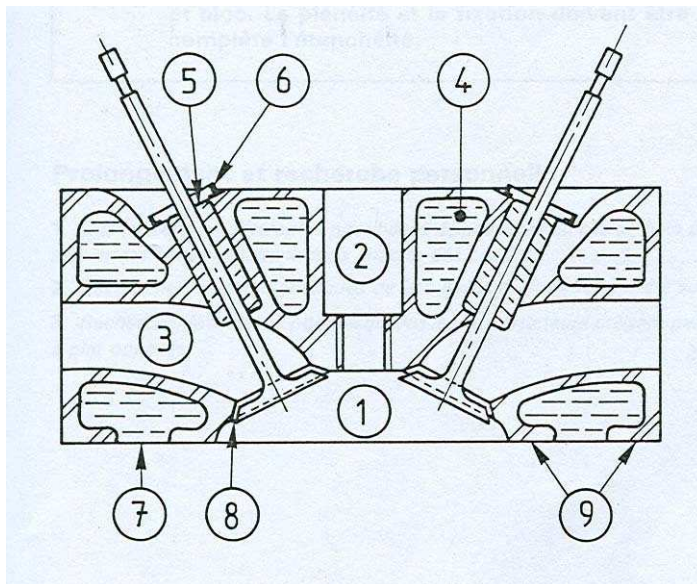


Fig. 4.5. Bloc-culasse

1. Chambre de combustion
2. Cheminée de bougie
3. Chapelle
4. Canalisation de refroidissement
5. Guide soupape
6. Rondelle d'appui du ressort
7. Communication avec le bloc
8. Siège de soupape
9. Plan de joint de culasse

#### 1.4. Carters de protection

Ce sont les couvercles qui couvrent ou ferment les différentes faces du moteur.

##### 1.4.1. Le carter inférieur

C'est une pièce en forme de cuvette qui abrite le vilebrequin et les têtes de bielle et qui contient la réserve d'huile de graissage. En général, il est en tôle emboutie. Il peut être en alliage léger moulé avec nervures extérieures pour assurer un bon refroidissement de l'huile échauffée par son passage dans le moteur.

L'étanchéité entre le carter-moteur et le carter inférieur doit être parfaite : elle est assurée par un joint plat en liège ou bien par un joint cylindrique, en caoutchouc synthétique, logé dans une gorge.

##### 1.4.2. Le carter de distribution

Pratiquement la distribution est matérialisée par une liaison mécanique entre le vilebrequin et l'arbre à cames. Cette liaison est protégée par un carter étanche en tôle ou en alliage léger, appelé le carter de distribution.

##### 1.4.3. Le couvre-culasse

Ce carter ferme la culasse des moteurs à soupapes en tête. Son intérêt est lié au fait que sa disposition permet l'opération d'atelier : "réglage des soupapes".

C'est un couvercle de protection étanche par joint comme le carter inférieur. Il est parfois en alliage léger.

#### 1.5. Collecteurs

Le collecteur d'admission regroupe les conduits qui amènent les gaz frais aux soupapes d'admission et le collecteur d'échappement contient ceux qui emmènent les gaz brûlés depuis les soupapes d'échappement.

Ce sont des pièces moulées, en alliage léger pour l'admission et en fonte pour l'échappement.

## 2. Éléments mobiles du moteur

Dans un moteur à piston alternatif, on transforme la poussée des gaz de la combustion, force unidirectionnelle, en mouvement circulaire d'un couple de force. Les pièces mécaniques chargées de cette transformation constituent les éléments mobiles du moteur : le piston, la bielle, le vilebrequin.

### 2.1. Piston

Le piston est l'organe qui, en se déplaçant dans le cylindre ou la chemise, transmet la poussée des gaz au vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle.

Le piston supporte 4 sortes d'effort :

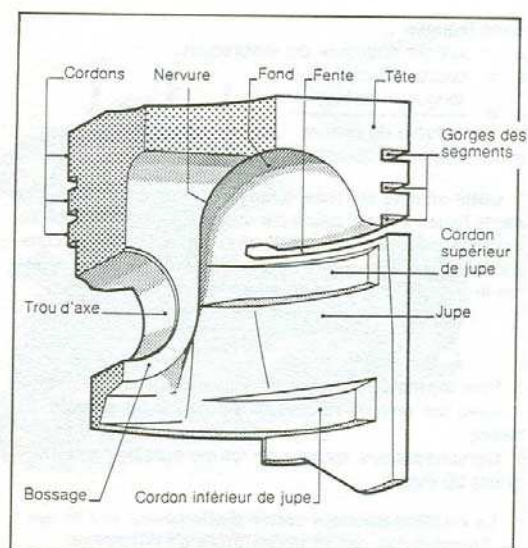
- Pression des gaz et température de l'explosion.
- Réaction de l'axe de la bielle (axe de piston).
- Réaction de la paroi du cylindre.
- Force d'inertie.

Il est en général moulé dans un matériau léger et d'une bonne conductibilité thermique comme les alliages d'aluminium.

La tête et le support d'axe, devant transmettre l'énergie mécanique, sont particulièrement renforcés.

Il se compose :

- D'une tête ou culot dont le diamètre doit être inférieur à l'alésage du cylindre quelles que soient les dilatations.
- L'étanchéité est assurée par des segments situés dans des gorges pratiquées sur le pourtour du piston.
- La jupe doit assurer le guidage à froid comme à chaud avec un minimum de frottement.



*Fig. 4.6. Coupe d'un piston*

## 2.2. Segments de piston

Les segments sont des anneaux brisés, de section carrée ou parallélépipédique, travaillant en extension. Ils doivent assurer des pressions radiales uniformes sur les parois du cylindre.

Les segments pour moteur à 4 temps sont en général au nombre de trois :

### 2.2.1. Le segment de feu (1<sup>er</sup> segment d'étanchéité)

Il assure l'étanchéité de la chambre de combustion. Il doit tenir à la température, au manque de lubrification, à la pression et à la corrosion. Il est généralement en fonte à graphite sphéroïdal durcie et chromée.

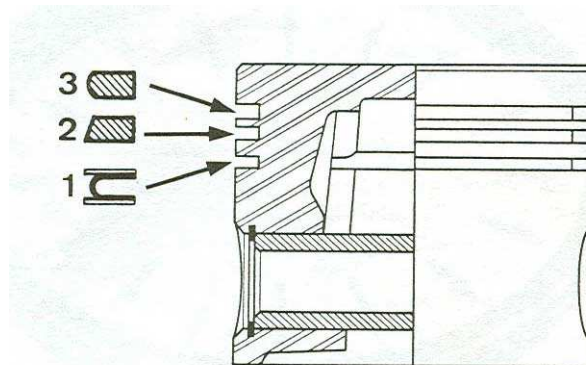
### 2.2.2. Le segment intermédiaire (2<sup>ème</sup> segment d'étanchéité)

Il assure l'étanchéité et évite la consommation d'huile. Il peut être en fonte grise à graphite lamellaire.

### 2.2.3. Le segment racleur

Il empêche l'huile pour éviter les remontées tout en laissant une certaine pellicule pour permettre la lubrification. Il possède des rainures ou encoches autorisant le retour d'huile.

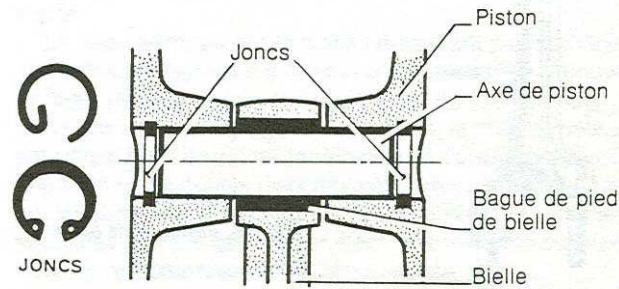
Il peut être en fonte grise ou en acier traité.



*Fig. 4.7. Segmentation du moteur*

## 2.3. Axe de piston

L'axe de piston est une pièce cylindrique qui lie le piston à la bielle. Il permet le mouvement oscillatoire bielle/piston pendant la rotation du moteur. Il transmet à la bielle la force de pression, que reçoit le piston pendant la phase expansion des gaz. Il est fabriqué en acier cémenté trempé, puis rectifié.



*Fig.4.8. Axe de piston monté flottant et arrêté par circlips*

### 2.3.1. L'axe de piston flottant

L'axe de piston coulisse à frottement doux dans les bossages du piston et dans la bague du pied de bielle.

Pour le remontage il se fait à froid. Il y a deux circlips d'arrêt.

### 2.3.2. L'axe serré dans la bielle

Le blocage de l'axe de piston dans le pied de bielle est assuré par frettage à chaud.

Ce montage augmente les mouvements axe/piston, mais réduit la masse alternative de l'embellage puisqu'on supprime la bague de pied de bielle et les circlips et on réduit le diamètre extérieur du pied de bielle.

### 2.3.3. L'axe libre dans la bielle, serré dans le piston

Pour le remontage il se fait après chauffage du piston dans l'eau bouillante. Il y a, de plus, deux circlips de sécurité.

## SYSTEME BIELLE-MANIVELLE

### 1. Bielle

La bielle est la pièce mécanique dont une extrémité est liée au piston par l'axe de piston et l'autre extrémité au maneton du vilebrequin. Elle permet la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu du vilebrequin.

#### 1.1. Description de la bielle

Elle se compose de trois parties :

**Le pied** relié à l'axe du piston, soit généralement avec une bague bronze, emmanchée à force, soit dans certains cas avec une bague à aiguilles.

**Le corps** est la partie comprise entre le pied et la tête.

Il est de section en forme de "H" ou "I" pour résister aux divers efforts de compression et de traction et pour éviter ainsi le flambage.

**La tête** de bielle qui tourne sur le maneton du vilebrequin est coupée dans un plan perpendiculaire à l'axe de la bielle pour permettre la pose des coussinets et son montage sur le maneton du vilebrequin.

La partie inférieure qui vient coiffer le maneton est appelée chapeau. Ce dernier est généralement fixé par des boulons et des écrous auto-serreurs. La coupe peut être droite ou oblique par rapport à l'axe de la bielle.

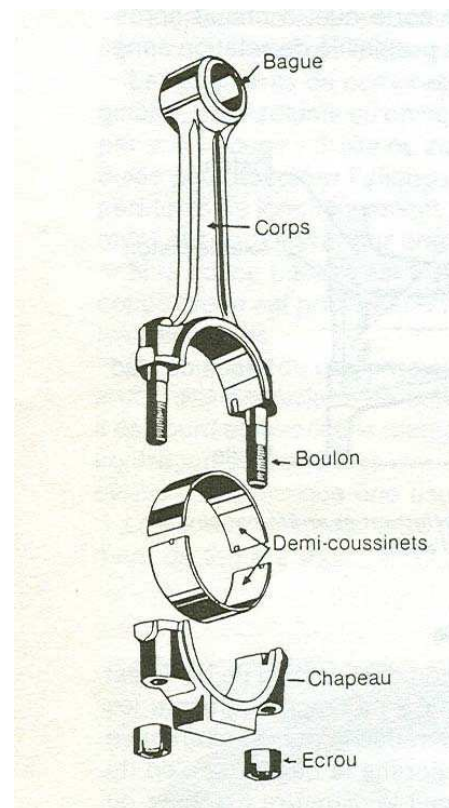


Fig. 5.1. *Eléments de bielle*

Pour permettre le tourbillonnement sur le vilebrequin on peut utiliser :  
soit des roulements à aiguilles;  
soit des coussinets minces.

Dans le premier cas, il faut alors démonter le vilebrequin en plusieurs éléments pour retirer la bielle.

La longueur de la bielle désigne la distance entre l'axe de la tête et l'axe du pied. Elle est comprise entre 1.7 et 2.5 fois la course.

### 1.2. Matière de la bielle

La bielle est en acier très résistant au nickel-chrome, parfois en acier mi-dur au carbone. On utilise également des bielles en alliage d'aluminium sur les moteurs poussés, en raison de sa grande légèreté.

### 1.3. Coussinets de tête

L'articulation de la tête de bielle avec le maneton de vilebrequin s'effectue par interposition d'un coussinet mince. Les coussinets minces permettent une bonne longévité et une bonne conductibilité. Ils se présentent sous la forme d'un support en acier, laminé à froid, roulé en demi-cercle, recouvert d'une fine couche de métal antifriction. Ce métal peut être de deux sortes : le régule, ou le bronze au plomb.

Le régule (métal gris) est constitué par des grains métalliques durs (cuivre et antimoine) enrobé dans un métal tendre (étain, plomb).

Le bronze au plomb se compose de :

Cu	70 à 80 %
Pb	20 à 30 %

Il existe aussi des coussinets en alliage à base d'aluminium avec un pourcentage d'environ 60% d'étain additionné d'un faible pourcentage de cuivre et de nickel.

### 1.4. Graissage de la bielle

Le graissage s'effectue toujours sous pression, sauf dans le cas de certains petits moteurs deux temps où il est réalisé par barbotage ou par projection d'huile.

Dans le graissage sous pression l'huile parvient à travers le maneton du vilebrequin au coussinet de tête de bielle qui comporte une rainure circulaire formant bain d'huile. Cette huile en s'échappant est projetée sur les cylindres par la vitesse de rotation de la tête de bielle et assure ainsi le graissage des cylindres et de l'intérieur du piston.

## 2. Vilebrequin

Le vilebrequin est la manivelle qui reçoit la poussée de la bielle et fournit un mouvement rotatif à partir du mouvement alternatif du piston.

La force exercée par la bielle applique au vilebrequin un couple qui se retrouve au bout de celui-ci sous forme de couple moteur.

A l'une des extrémités du vilebrequin, le couple moteur est utilisé pour entraîner le véhicule.

A l'autre extrémité, une fraction du couple disponible est prélevée pour entraîner les auxiliaires du moteur : la distribution (arbre à cames, soupapes, etc.), le générateur électrique (dynamo ou alternateur), le compresseur de climatisation, etc.

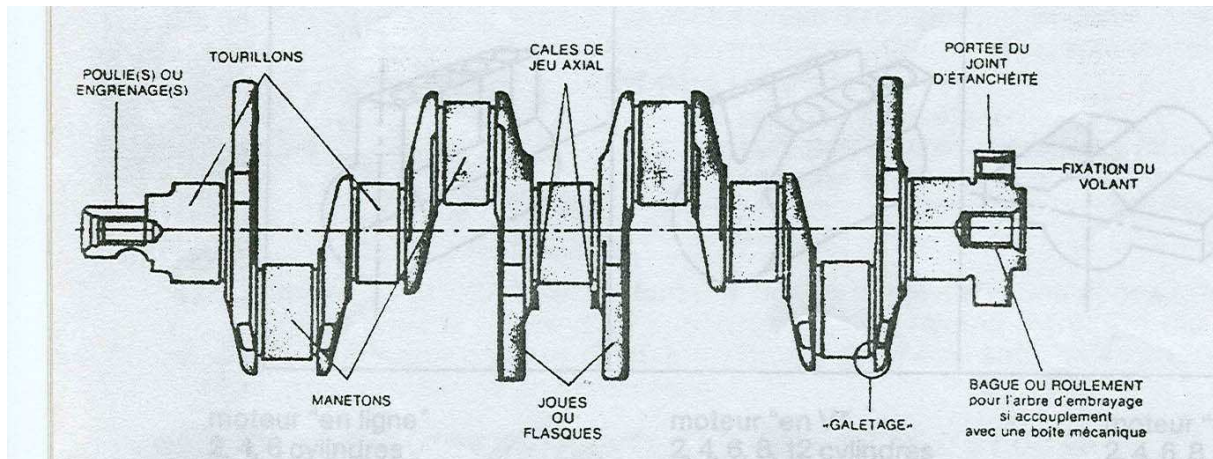


Fig. 5.2. Vilebrequin

### 2.1. Condition à remplir

Le vilebrequin est soumis notamment :

- aux torsions provenant des efforts opposés du couple moteur et du couple résistant.
- aux flexions, compressions, allongements et cisaillements.
- aux frottements au niveau des portées.
- aux vibrations provenant de la masse du vilebrequin lancé à grande vitesse (force centrifuge).

Il doit être conçu de manière à résister aux efforts qui lui sont demandés :

- Bras de manivelle robustes :
  - grande surface des portées, manetons et tourillons;
  - géométrie indéformable;
  - alignement des axes de tourillons (ligne d'arbre);
  - distance entre axes de manetons et axes de tourillons (course piston).
- Equilibrage parfait tant en conditions statiques que dynamiques.

### 2.2. Réalisation pratique

Le vilebrequin peut être réalisé :

- par forgeage, en acier au nickel-chrome ou manganèse.
- par moulage, en fonte au chrome ou silicium.

Il reçoit des traitements thermiques.

Les manetons et tourillons sont tournés, puis rectifiés.

### 2.3. Graissage des paliers

Le graissage est assuré par l'huile du moteur amenée sous pression aux paliers du vilebrequin dont les coussinets sont percés et comportent une gorge circulaire qui alimente les conduits percés dans les bras du vilebrequin, conduits qui emmènent l'huile jusqu'au maneton.

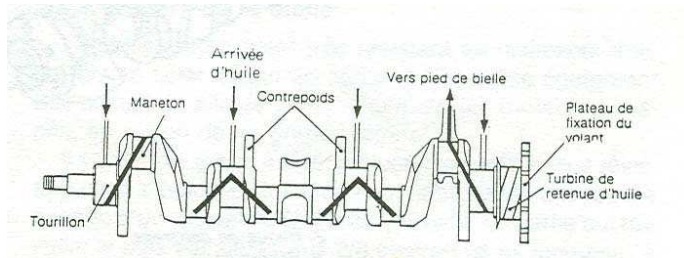


Fig. 5.3. Graissage des paliers d'un vilebrequin

## 3. Equilibrage d'un moteur

### 3.1. Equilibrage des efforts et inerties

L'équilibrage d'un moteur polycylindre à 4 temps consiste à distribuer judicieusement les temps moteurs au cours d'un cycle de 2 tours de vilebrequin et à répartir les masses des pièces en mouvement de façon que la résultante des forces de poussée et d'inertie, combinée avec les forces centrifuges, fournisse un couple moteur le moins variable possible et que les forces de réaction aux points de fixation du moteur sur le châssis soient le plus constantes possible.

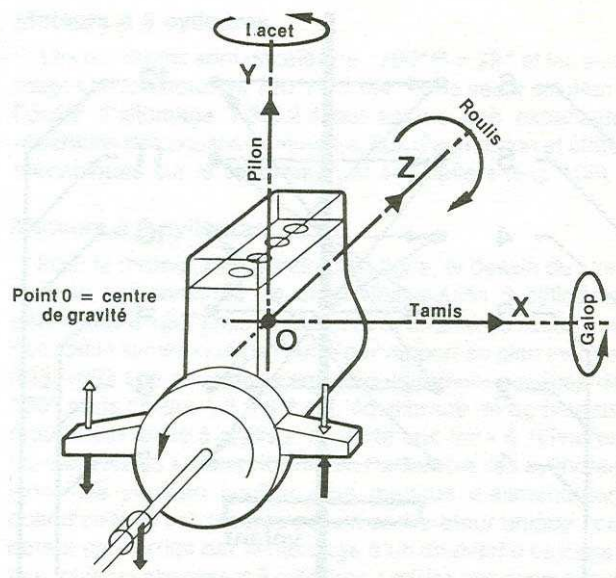


Fig. 5.4. Mouvements du moteur autour de son centre de gravité engendrés par les vibrations

### 3.2. Positionnement angulaire des manetons

Pour avoir un fonctionnement régulier on répartit les temps moteurs de manière uniforme.

Le cycle s'effectuant sur deux tours de vilebrequin, on détermine l'écart angulaire ( $\alpha$ ) entre deux manetons par :

$$\alpha = \frac{720^\circ}{n} \quad \text{d'où } n - \text{ nombre de cylindres}$$

En configuration classique, 4 cylindres "en ligne", les manetons et les paliers du vilebrequin sont dans un même plan. Les manetons sont décalés de  $180^\circ$  dans l'ordre d'allumage.

En configuration V à  $90^\circ$ , les 4 cylindres sont disposés en 2 lignes de 2 cylindres formant un angle de  $90^\circ$ . Les manetons sont décalés de  $90^\circ$  dans l'ordre 1-3-4-2.

**Exemples :**

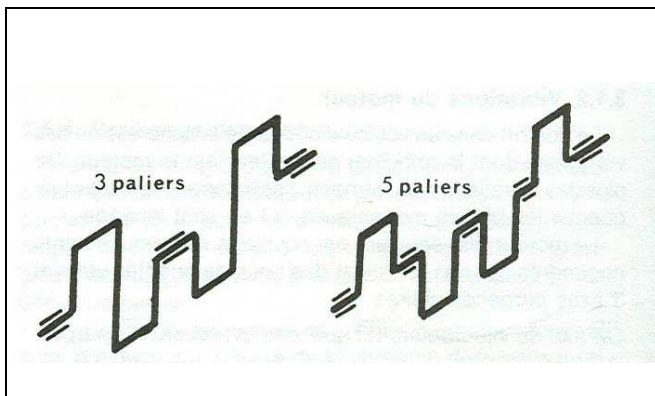


Fig. 5.5 Vilebrequin 4 cylindre en ligne

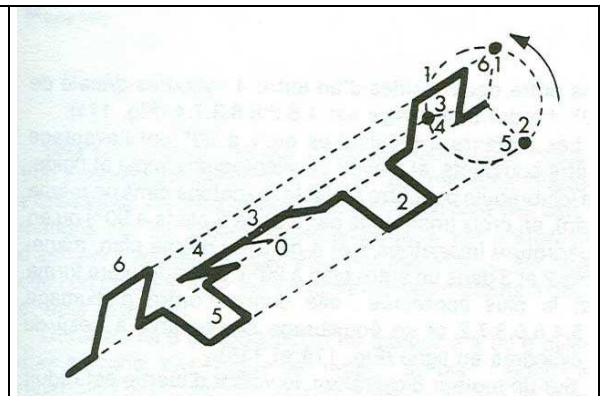


Fig. 5.6. Vilebrequin 6 cylindre en ligne

### 3.3. Ordre d'allumage

Pour le moteur à 4 cylindres en ligne il y a deux ordres possibles : 1-3-4-2 et 1-2-4-3. L'ordre d'allumage le plus couramment utilisé est le premier nommé, pour des raisons de meilleur écoulement du fluide gazeux.

	$0^\circ$	$180^\circ$	$360^\circ$	$540^\circ$	$720^\circ$
Cylindre 1	Comb.-Détente	Echappement	Admission	Compression	
Cylindre 2	Echappement	Admission	Compression	Comb.-Détente	
Cylindre 3	Compression	Comb.-Détente	Echappement	Admission	
Cylindre 4	Admission	Compression	Comb.-Détente	Echappement	
Ordre de l'allumage	<b>1-3-4-2</b>				

*Exemple d'autres types de moteurs :*

L'ordre d'allumage de moteur à 6 cylindres en ligne : 1-5-3-6-2-4.

Moteur en V 6 cylindres : 1-6-3-5-2-4.

Moteur en V 8 cylindres : 1-6-2-5-8-3-7-4.

## SYSTEME DE DISTRIBUTION

### 1. Généralités

Un moteur est constitué d'un ou plusieurs cylindres dans lesquels circulent les pistons reliés au vilebrequin par les bielles.

Dans ces cylindres, on introduit un mélange gazeux composé d'air et d'essence vaporisée, dont on désire extraire le maximum d'énergie mécanique utile.

Jusqu'à ce jour, la meilleure méthode consiste à faire subir, à la masse de gaz chargée dans le cylindre, le cycle à 4 temps qui se déroule pendant deux tours de vilebrequin.

#### 1.1. Définition de la distribution

On appelle "distribution" l'ensemble des organes qui réalisent l'ouverture et la fermeture des conduits d'admission et d'échappement, et des éléments qui effectuent leur commande.

Le rôle de la distribution est de commander l'ouverture et la fermeture des soupapes, imposer leur instant de l'ouverture, l'amplitude et la durée du mouvement.

Le principe de fonctionnement de la distribution est suivant :

L'ouverture et la fermeture des cylindres sont réalisées par les soupapes.

L'ouverture est possible grâce à des cames, la fermeture est assurée par des ressorts.

La transmission du mouvement de l'arbre à cames aux soupapes est assurée par des poussoirs. Elle peut comprendre également des tiges de culbuteurs et des culbuteurs.

La synchronisation avec le vilebrequin est réalisée par des pignons reliés entre eux par un système indé réglable (ex. chaîne, courroie...).

#### 1.2. Réalisation de l'épure de distribution

Rappelons dans le cycle réel avant réglage que les soupapes s'ouvrent et se ferment rigoureusement au passage d'un point mort.

En fait un moteur qui fonctionnerait suivant ce calage aurait un rendement déplorable, car l'admission et l'échappement seraient mal réalisés, compte tenu de l'inertie des masses gazeuses à mettre en mouvement.

Afin de remédier à cela on augmente le temps d'ouverture des soupapes.

On a déjà défini ainsi :

Pour le temps admission :      Avance Ouverture Admission (AOA),  
Retard Fermeture Admission (RFA).

Pour le temps échappement :      Avance Ouverture Echappement (AOE),  
Retard Fermeture Echappement (RFE).

Le piston se trouve quelques millimètres avant ou après les points morts au moment des avances et des retards.

*Par exemple :* En AOA, le piston se trouve quelques millimètres avant le PMH, vers la fin du temps échappement du cycle précédent.

On observe que dans cette position, le maneton de bielle se trouve positionné quelques degrés avant la verticale.

En constatant qu'à chaque position du piston correspond une position angulaire du vilebrequin, nous pouvons indiquer les valeurs des réglages :

- soit en millimètres de course du piston,
- soit en degrés de rotation du vilebrequin.

Donc, l'épure circulaire c'est la représentation graphique permet de visualiser les angles de la distribution d'un moteur.

Nous constatons que, comme dans le diagramme réel, le temps échappement se termine alors que le temps admission est déjà commencé.

On appelle ce point le croisement des soupapes.

Les valeurs d'avance et de retard d'ouverture et de fermeture varient suivant les types de moteurs et sont obtenues par la forme donnée aux cames.

*Exemple d'épure de distribution :*

- $AOA = 5^\circ$
- $RFA = 31^\circ$
- $AOE = 46^\circ$
- $RFE = 6^\circ$

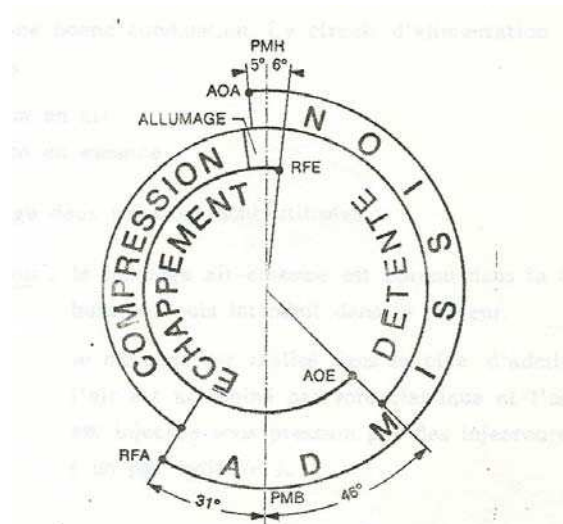


Fig. 6.1. Epure circulaire de distribution

## 2. Éléments de la distribution

### 2.1. Différents types de distribution

#### 2.1.1. Emplacement de l'arbre à cames

Deux solutions sont utilisées :

- L'arbre à cames est appelé *latéral* lorsqu'il est situé sur le côté du bloc moteur.
- Il est appelé *arbre à cames en tête* lorsqu'il est placé sur la culasse à proximité immédiate des soupapes.

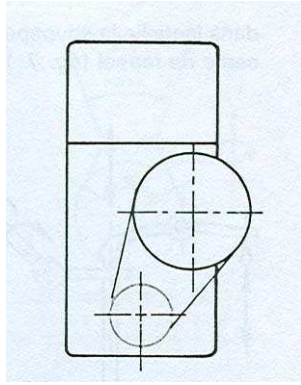


Fig. 6.2. Arbre à cames latéral

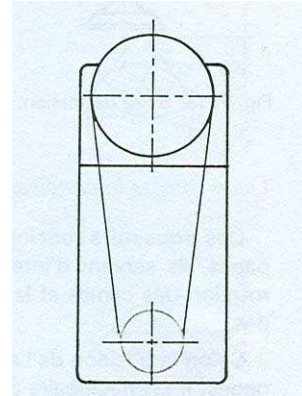


Fig. 6.3. Arbre à cames en tête

Selon la disposition des cylindres et celle des soupapes on peut trouver des moteurs ayant deux ou quatre arbres à cames en tête.

Les arbres à cames en tête permettent une attaque plus directe sur les soupapes. Le nombre de pièces en mouvement, les jeux et les usures sont ainsi diminués.

### 2.1.2. Entraînement de l'arbre à came

Dans tous cas c'est le vilebrequin qui assure l'entraînement de l'arbre à cames.

L'arbre à cames doit tourner deux fois moins vite que le vilebrequin car les soupapes ne doivent s'ouvrir qu'une fois par cycle.

Trois solutions sont utilisées :

- Les engrenages utilisés particulièrement dans les moteurs Diesel
- Les pignons reliés par chaîne. Ce système est couramment utilisé dans les moteurs à arbre à cames latéral et dans certains arbres à cames en tête.
- Les pignons reliés par courroie crantée. Système de plus en plus répandu dans les moteurs à arbre à cames en tête. Son fonctionnement est plus silencieux et ne nécessite pas de système de lubrification.

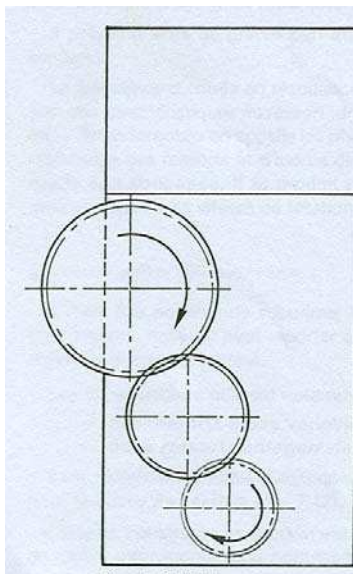


Fig. 6.4. Liaison par engrenage

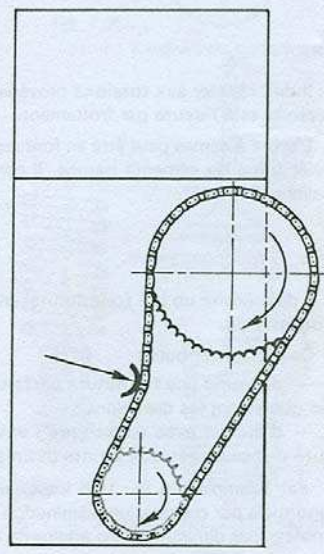


Fig. 6.5. Liaison par chaîne

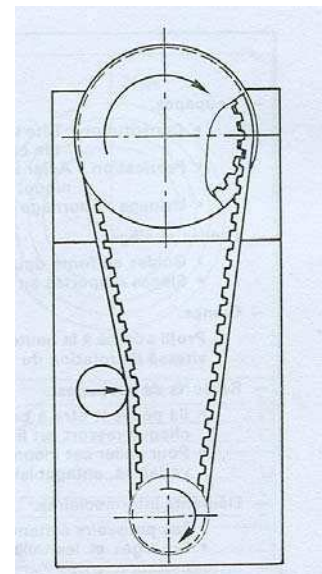


Fig. 6.6. Liaison par courroie crantée

## 2.2. Les soupapes

Les soupapes sont les organes qui régissent l'entrée et la sortie des gaz dans la chambre de combustion.

Le diamètre de leur tête doit être important. Cette dimension est limitée par la place libre dans la chambre de combustion, le poids de la soupape qui doit rester minimal, et par sa résistance mécanique aux chocs et aux déformations.

La portée conique assure une étanchéité parfaite à la fermeture et un centrage correct évitant la déformation de la tige. Les angles de portée sont d'environ  $90^\circ$ .

Les soupapes d'admission qui subissent des températures moins élevées peuvent avoir un angle de  $120^\circ$ , protégeant moins bien la soupape des déformations, mais offrant, pour une même hauteur de levée, une section de passage de gaz plus importante.

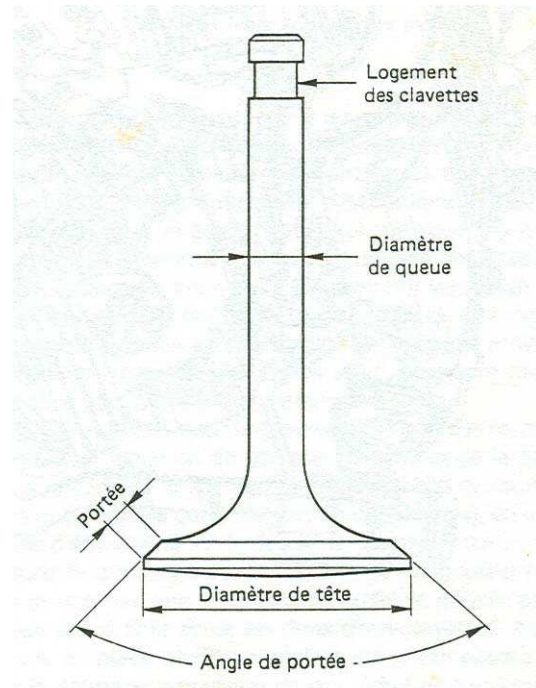


Fig.6.7. Détails d'une soupape

Les soupapes de grande série sont en acier au nickel-chrome et obtenues par matriçage avec chauffage électrique. Ils sont tournés puis rectifiés. Les queues et les portées reçoivent un traitement qui accroît leur dureté.

Pour les moteurs présentant des surchauffes au niveau des soupapes, on dispose de soupapes à tige creuse et partiellement remplies de sodium ou des sels de lithium et potassium.

## 2.3. Les ressorts de soupapes

Autour de la tige de chaque soupape, on monte un ressort hélicoïdal comprimé entre une face usinée du carter fixe et une cuvette en acier solidaire de la queue de soupape.

Lorsqu'on comprime un ressort à une fréquence élevée celui-ci risque d'entrer en résonance. On dit qu'il y a "affolement des soupapes".

Pour éviter l'affolement des soupapes les constructeurs utilisent notamment :

- des ressorts à pas variable;
- deux ressorts antagonistes (sens d'hélice opposé; le diamètre de l'un n'est que de 0.5 mm supérieur au diamètre extérieur de l'autre, de sorte qu'il y a frottement entre eux et étouffement des vibrations).

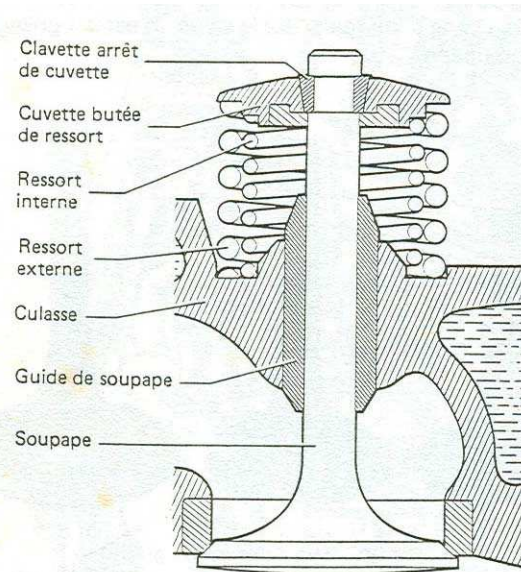


Fig.6.8. Montage de deux ressorts concentriques

#### 2.4. Les éléments intermédiaires

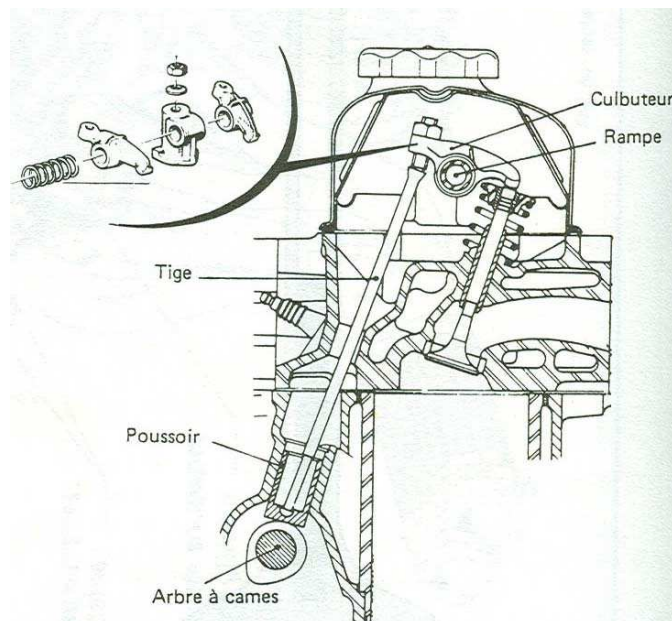


Fig. 6.9. Eléments intermédiaires

##### 2.4.1. Culbuteurs

Un culbuteur est un levier basculant qui fait partie de la transmission secondaire alternative de la commande de distribution.

Le culbuteur reçoit en un point la poussée de la came, soit directement soit par l'intermédiaire d'une tige, et par un autre point pousse la soupape en ouverture.

Le culbuteur peut être en fonte, matériau convenant pour les parties frottantes. Il peut être en acier, mais nécessite alors un traitement thermique pour durcir les parties frottantes.

### 2.4.2. Tiges de culbuteur

La tige de culbuteur est un élément de la commande de distribution qui transmet le mouvement de la came au culbuteur dans un moteur culbuté.

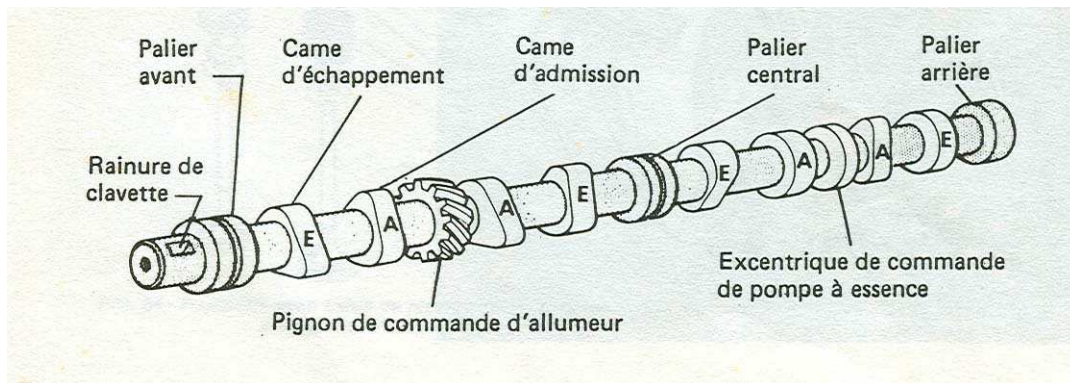
Elle comporte une extrémité de forme sphérique qui appuie au fond du poussoir et l'autre extrémité en forme de cuvette dans laquelle s'articule la vis de réglage portée par le culbuteur.

### 2.4.3. Poussoirs

Des poussoirs sont interposés entre les cames et les soupapes. Ils servent d'intermédiaire entre le mouvement de rotation des cames et le mouvement rectiligne des soupapes.

Selon la position de l'arbre à cames par rapport aux soupapes, il est nécessaire d'interposer des culbuteurs et des tiges de culbuteurs.

## 2.5. L'arbre à cames



*Fig. 6.10. Arbre à cames*

L'arbre à cames est l'élément le plus important de la commande de distribution. Il est chargé de commander de façon très précise la levée des soupapes et d'assurer cette levée pendant une durée bien déterminée, correspondant au diagramme de distribution du moteur.

Il doit résister aux torsions provenant de la poussée des ressorts et à l'usure par frottement.

L'arbre à cames peut être en fonte spéciale moulée ou en acier forgé ou cémenté trempé.

Selon la disposition des cylindres et celle des soupapes on peut trouver des moteurs ayant deux ou quatre arbres à cames en tête.

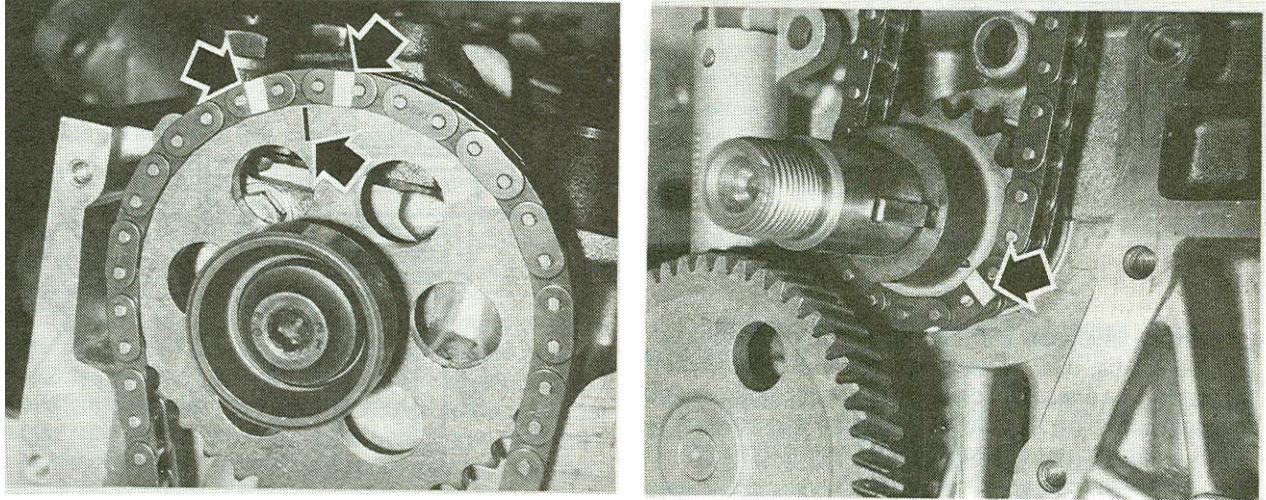
## 3. Calage de la distribution

Quel que soit le système de commande de la distribution, le monteur ou le réparateur se trouve confronté au problème du positionnement relatif des éléments afin que le mouvement de l'arbre à cames soit coordonné avec celui du vilebrequin de sorte que les soupapes se lèvent et se ferment au moment où les pistons passent par un point donné de leur cycle.

Cette opération de positionnement est appelée : "calage de la distribution".

Dans la pratique les constructeurs prévoient des repères sur les différents éléments de la commande de distribution : pignons, roues de chaîne, roues dentées, chaînes et courroies.

Il suffit que le monteur associe ces repères pour que le montage soit correct.



*Fig. 6.11. Calage de la distribution*

#### **4. Jeu des soupapes**

On appelle "jeu des soupapes" l'espace qu'il convient de laisser, moteur arrêté, entre l'extrémité de la queue de soupape et sa commande pour garantir l'appuie de la tête de soupape sur son siège, malgré les variations de température auxquelles sont soumis les éléments du moteur.

Ce jeu a pour buts :

- d'assurer une fermeture parfaite des soupapes quelles que soient les dilatations;
- d'assurer avec exactitude l'ouverture et la fermeture des soupapes aux points définis par le constructeur.

Par exemple, un jeu trop important produit une usure anormale par chocs et une diminution des performances du moteur par diminution des angles de distribution.

Le constructeur préconise un jeu à froid généralement compris entre :

- 0.10 et 0.30 mm pour l'admission;
- 0.20 et 0.40 mm pour l'échappement.

## SYSTEME DE LUBRIFICATION

### 1. Rôle de système de lubrification

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. Lubrifiants

#### 2.1. Caractéristiques d'un lubrifiant

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°C à -20°C.

## 2.2. Différents types d'huiles moteurs

Les huiles moteurs 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 donné 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°F (-18°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°F (100°C).
- une huile SAE 40 est plus visqueuse qu'une huile SAE 30 à la température de 210°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.

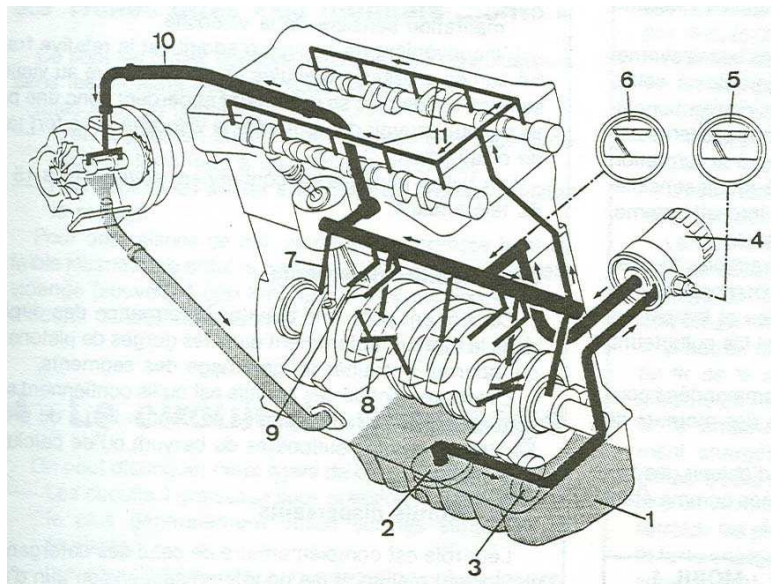
*Exemple :* 15W40

- 15W        viscosité à 0°F,
- 40         viscosité à 210°F.

## 3. Circuit de graissage

On peut distinguer deux types de circuits de graissage :

- Les circuits à graissage sous pression et à bain d'huile, le plus généralement utilisé sur les véhicules de tourisme.
- Le circuit à graissage sous pression et à carter sec, réservés à certaines applications particulières (véhicules tous terrains ou véhicules de compétition).



1. Carter inférieur du réservoir d'huile
2. Crépine d'aspiration
3. Pompe à huile
4. Filtre à huile
5. Manomètre de pression
6. Thermomètre
7. Graissage des paliers de vilebrequin
8. Conduits percés dans le vilebrequin
9. Arrosage des pistons
10. Graissage des paliers du turbocompresseur
11. Graissage des paliers d'arbre à cames

Fig.7.1. Circuit de graissage

### 3.1. Graissage sous pression et à bain d'huile

Le carter inférieur constitue une réserve d'huile. Cette dernière est aspirée au travers d'une crépine par une pompe, qui la refoule à une pression dont la valeur maximale (environ 4 à 5 bars) est contrôlée par une soupape de décharge, vers successivement :

- le filtre à huile;
- la rampe principale qui alimente les paliers de vilebrequin;
- la rampe de distribution qui permet de lubrifier les contacts cames-patins ou cames-poussoirs.

L'huile retombe ensuite par gravité dans le carter inférieur par des retours prévus à cet effet.

### 3.2. Graissage sous pression et à carter sec

Dans ce cas l'huile qui retombe dans le carter inférieur est aussitôt aspirée par une pompe d'épuisement vers un réservoir d'huile souvent séparé du moteur. De là, l'huile est aspirée puis refoulée sous pression par une pompe d'alimentation analogue, ainsi que le reste de circuit de graissage.

La pompe d'épuisement a un débit largement supérieur à celui de la pompe d'alimentation, dans un rapport de l'ordre de 1.5 à 2. Elle aspire donc, en même temps que de l'huile, une certaine quantité d'air. D'où l'intérêt de ce type de moteur, d'huiles ayant de bonnes propriétés anti-mousse.

Le réservoir d'huile permet une désaération de l'huile avant son départ vers la pompe d'alimentation.

Les deux pompes, d'épuisement et d'alimentation peuvent être toutes deux des pompes à engrenages entraînées par un même arbre.

### 3.3. Pompe à huile

La pompe à huile est entraînée soit :

- par un arbre commandé par l'arbre à cames à l'aide d'un renvoi d'angles.
- directement en bout d'arbre à cames.
- à partir d'un pignon situé sur le vilebrequin.

Les principaux types de pompes sont :

- Les pompes à engrenages.
- Les pompes à palettes.
- Les pompes "Trochoïde" ou pompes à rotor.
- Les pompes à piston.

#### 3.3.1. Pompe à engrenages

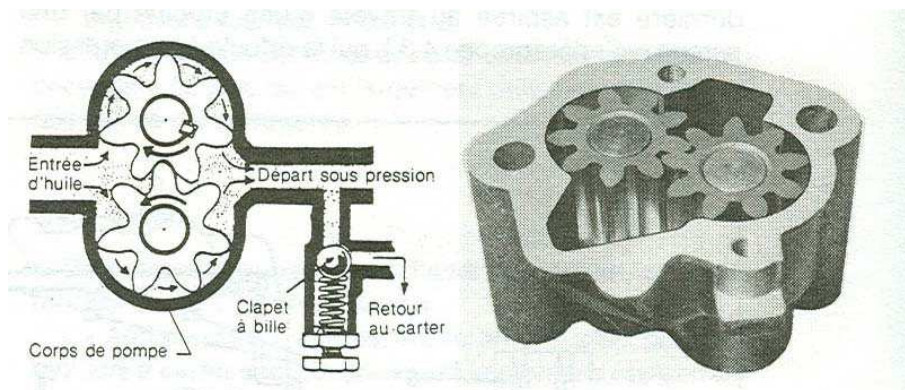
C'est le type de pompe le plus utilisé dans les moteurs de véhicules modernes, c'est aussi le plus simple.

La pompe se compose essentiellement de deux pignons cylindriques engrenant l'un dans l'autre et contenus dans le corps de pompe.

L'un des pignons est solidaire de l'arbre de commande de la pompe, cependant que l'autre tourne "fou" autour de son axe, entraîné par le pignon moteur.

Les deux pignons tournant dans l'huile, l'aspiration se fait entre les deux pignons d'un côté de la pompe, le refoulement se faisant de l'autre côté.

Les pignons peuvent être en acier, en fonte ou en bronze. Leur denture peut être droite ou hélicoïdale.



*Fig. 7.2. Pompe à huile à engrenages extérieurs*

Il est essentiel que la pompe à huile soit en bon état et capable de fournir une pression d'une dizaine de bars, lorsque le moteur tourne à 3000 tr/min.

On doit limiter la pression dans le circuit (environ 3 à 4 bars) afin de ne pas surcharger la pompe et d'éviter une consommation d'huile excessive.

Pour cela un clapet est monté en dérivation en sortie de pompe. C'est le tarage du ressort qui détermine la pression dans le circuit.

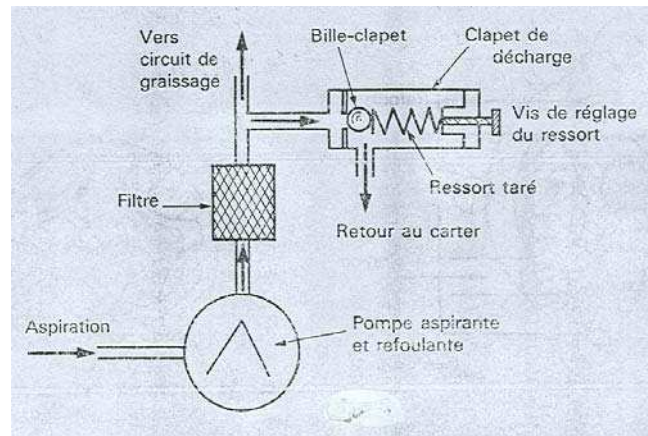


Fig. 7.3. Clapet de décharge

### 3.3.2. Pompe à palettes

L'intérieur du corps de pompe est de forme circulaire. Il est relié à deux canalisations, l'une pour l'aspiration, l'autre pour le refoulement.

Un noyau excentré porte deux palettes en contact avec les parois du cylindre à l'aide d'un ressort.

L'excentration permet l'écartement ou le rapprochement des palettes pendant la rotation.

Les deux palettes divisent l'intérieur du corps en deux parties : l'une est le côté aspiration, l'autre le côté refoulement.

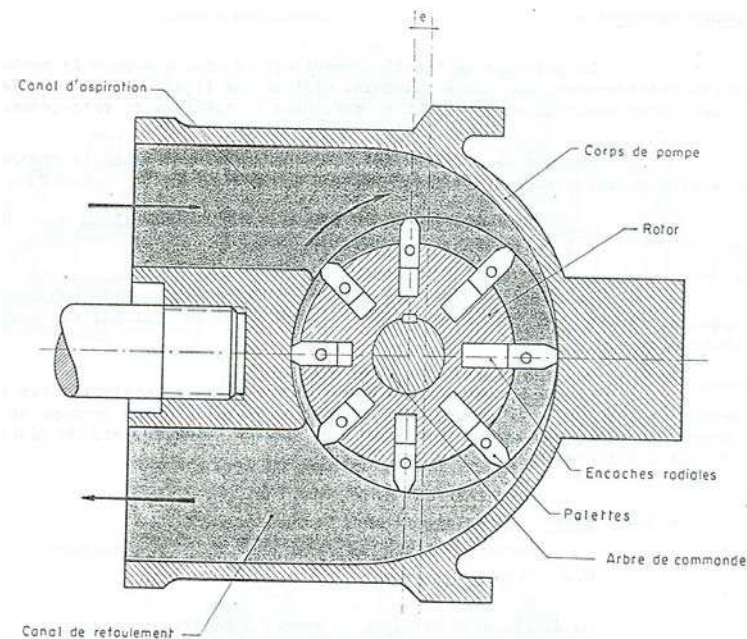


Fig. 7.4. Pompe à palettes

### 3.3.3. Pompe à rotor

Le boîtier est cylindrique, le raccordement avec les canalisations d'entrée et de sortie d'huile est latéral. Il se fait par le fond du boîtier. Une pièce évidée (1), appelée rotor extérieur, tourne dans le boîtier. Cette pièce comporte cinq évidements, elle est libre en rotation et est entraînée par un rotor intérieur (3) claveté sur l'arbre de commande. Ce rotor comporte quatre dents et est excentré par rapport au boîtier.

Ce rotor est une sorte de pignon à quatre dents qui entraîne une roue à denture intérieure à cinq dents.

La rotation de cette roue devant les canalisations d'aspiration et de refoulement engendre une variation de volume qui assure l'entrée et la sortie d'huile.

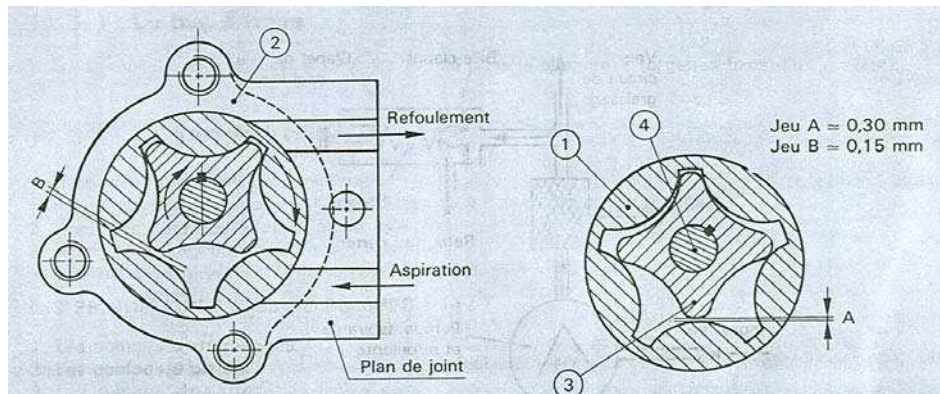


Fig. 7.5. Pompe à rotor

### 3.3.4. Pompe à engrenages intérieurs

Son fonctionnement est comparable à celui de la pompe à rotor étudié précédemment.

Les deux pignons sont séparés par une demi-lune. L'huile entraînée entre chaque dent, de part et d'autre de la demi-lune est refoulée lorsque les pignons engrènent à nouveau.

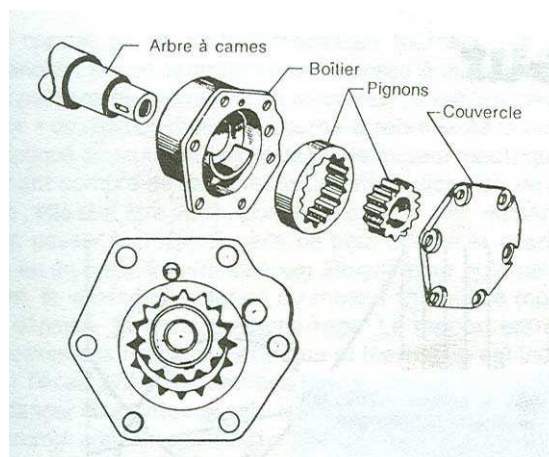


Fig. 7.6. Pompe à engrenages intérieurs

### 3.3.5. Pompe à piston

Le piston est commandé par une bielle actionnée par un excentrique monté sur l'arbre de commande.

Il y a deux clapets :

- Un clapet d'admission constitué par une bille.
- Un clapet de décharge permettant de régler la pression de refoulement.

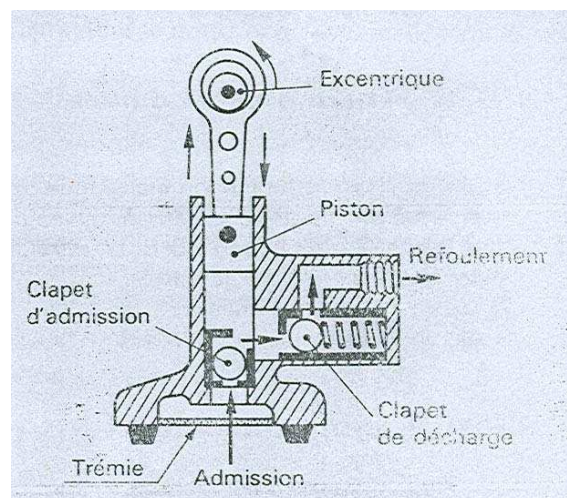


Fig. 7.7. Pompe à piston

### 3.4. Filtres à 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.

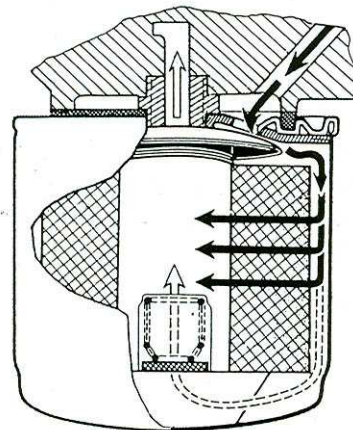
Le filtre doit être chargé périodiquement ainsi que l'huile.

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.



*Fig. 7.8. Filtre à huile*

**Flèches noires** : l'huile est filtrée.

**Flèche blanche en pointillés** : le filtre est court-circuité.

## SYSTEME DE REFROIDISSEMENT

### 1. Rôle du refroidissement

Le rendement du moteur (le rapport entre l'énergie fournie par l'arbre moteur et l'énergie apportée par la combustion) ne dépasse généralement pas 30% dans les moteurs à allumage commandé.

La quantité d'énergie à évacuer par le refroidissement varie en fonction de la charge du moteur.

Au cours du cycle, la température des gaz au sein du cylindre varie de quelques degrés à 2000°C.

Les parois de la culasse et de la chemise suivent ces variations avec une amplitude beaucoup plus faible. Ces écarts (de 60 à 80°C autour d'une moyenne de 200°C pour la peau des parois de la culasse par exemple) suffisent parfois à provoquer des contraintes thermiques cycliques préjudiciables à la tenue des pièces (craques thermiques dans la culasse, déformations permanentes de la culasse entraînant des problèmes d'étanchéité au niveau du joint de culasse...).

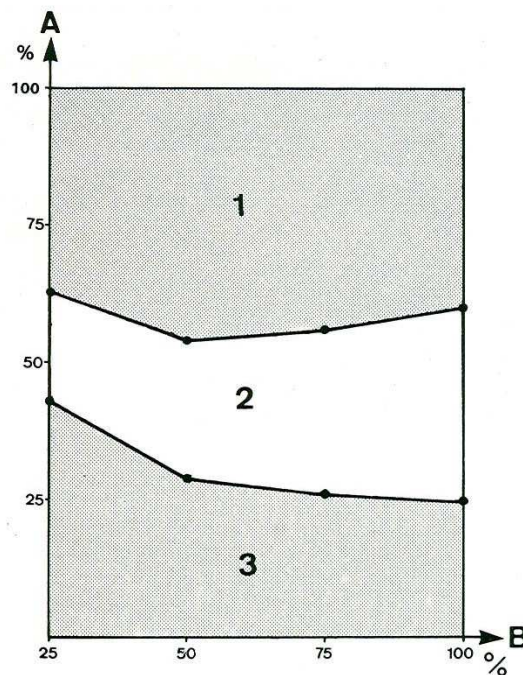


Fig. 8.1. Répartition de l'énergie contenue dans le carburant

#### 1.1. Avantages du refroidissement

- Maintien de la température des éléments de la chambre de combustion en dessous de certaines limites pour assurer leur résistance mécanique.
- Diminution de la température de l'huile afin d'assurer une bonne lubrification du contact segment/cylindre et aussi de diminuer les risques de grippage des pistons ou de gommage des segments.
- Maintien d'un taux de remplissage correct (échauffement des gaz frais plus réduit).

- Eloignement des limites du cliquetis (combustion anormale).

### 1.2. Avantages des températures élevées

- Obtention de rendements plus élevés (diminution des pertes aux parois).
- Amélioration de la préparation du mélange air/carburant.
- Limitation de la production d'hydrocarbures imbrûlés et d'acides sulfureux au contact des parois.

En conclusion, il est donc rationnel de refroidir les parois du moteur à la condition de ne pas le faire trop énergiquement.

L'expérience montre qu'il est intéressant de maintenir la température des parois :

- autour de 120°C pour les chemises.
- autour de 180 à 240°C pour la culasse.

**Remarque:** Si l'on élève la température de régulation de l'eau de 10°C, on élève aussi de 10°C les températures des parois.

## 2. Différents systèmes de refroidissement

Les principaux systèmes de refroidissement sont :

- Le refroidissement par eau : une circulation d'eau interne refroidit le moteur, ensuite l'eau est refroidie dans un radiateur.
- Le refroidissement par air : un courant d'air frais passe sur le moteur et le refroidit.

En automobile, c'est le refroidissement par eau qui est le plus utilisé.

## 3. Refroidissement par eau

Dans ce système le moteur, en particulier la culasse et le bloc-cylindres, comporte des cavités (chambres d'eau) dans lesquelles circule l'eau de refroidissement.

La circulation de l'eau est assurée par une pompe centrifuge.

La figure ci-dessous représente un circuit de refroidissement d'eau :

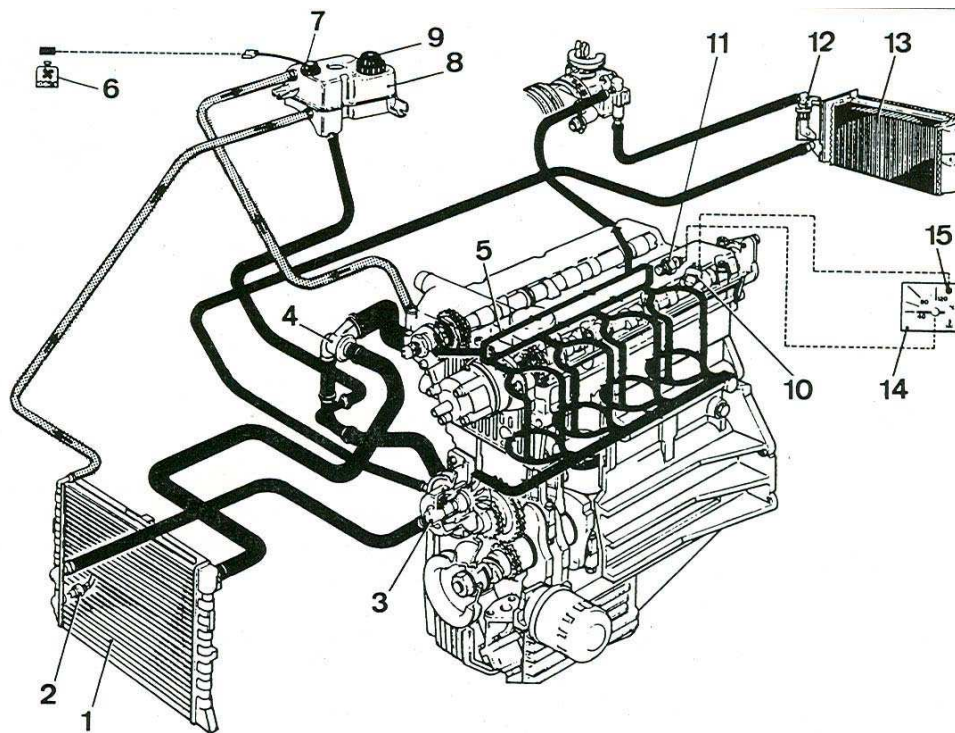


Fig. 8.2. Circuit de refroidissement d'un moteur

- |   |   |
|---|---|
| 1. Radiateur                              | 10. Sonde de température du liquide de refroidissement                        |
| 2. Sonde du ventilateur électrique        | 11. Sonde pour lampe témoin de température maxi du liquide de refroidissement |
| 3. Pompe à eau                            | 12. Robinet de chauffage  |
| 4. Soupape thermostatique                 | 13. Radiateur de chauffage  |
| 5. Culasse                                | 14. Indicateur de température du liquide de refroidissement                   |
| 6. Lampe témoin de niveau mini du liquide | 15. Lampe témoin de température du liquide de refroidissement.                |
| 7. Jauge à liquide                        |   |
| 8. Réservoir d'expansion                  |   |
| 9. Bouchon du réservoir d'expansion       |   |

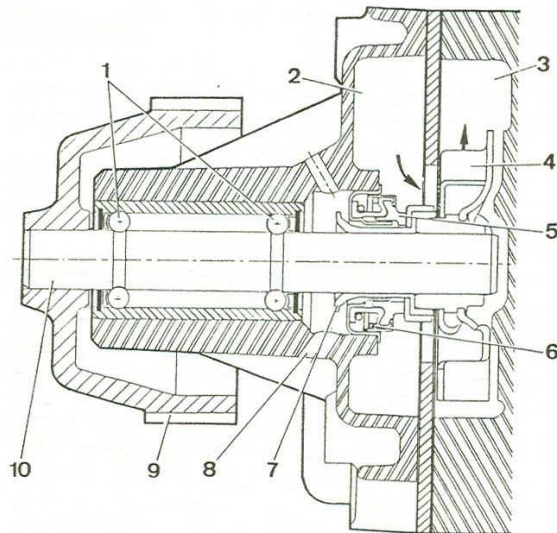
### 3.1. La pompe à eau

La fonction de la pompe à eau est de faire circuler le liquide de refroidissement dans le moteur et le radiateur, pour éliminer les calories.

La pompe est généralement entraînée par une poulie liée en rotation au vilebrequin par l'intermédiaire d'une courroie.

La pompe à eau comprend deux parties :

- a) Une partie "roulements" destinée à permettre la rotation de l'arbre et absorber l'effort de tension de la courroie.
- b) Une partie "turbine", immergée dans le circuit d'eau et assurant la circulation de cette dernière.  
Cette deuxième partie doit être séparée de façon étanche de la première pour éviter une entrée d'air dans le circuit ou une fuite d'eau vers les roulements.



1. Roulement à billes
2. Zone d'arrivée d'eau
3. Zone de refoulement de l'eau
4. Turbine
5. Bague d'étanchéité
6. Ressort
7. Déflecteur
8. Trou d'évacuation
9. Poulie d'entraînement
10. Arbre

Fig. 8.3. Pompe à eau "Turbo-Joint"

### 3.2. La circulation de l'eau à l'intérieur du moteur

L'eau circule au travers du bloc-cylindres et remonte à la culasse par les trous pratiqués dans le joint de culasse.

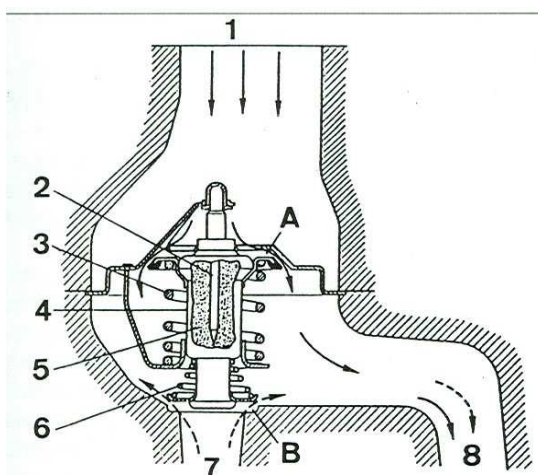
La mise au point du circuit d'eau consiste à faire une bonne répartition du débit d'eau et à augmenter la vitesse du liquide autour des zones chaudes des cylindres et de la culasse. Cette mise au point est réalisée en calibrant le diamètre des trous de passage d'eau dans le joint de culasse.

### 3.3. Le thermostat

Pour assurer une montée en température rapide du moteur, il faut éviter de faire circuler le liquide de refroidissement dans le radiateur en dessous d'une certaine température. Ce rôle est assuré par le thermostat.

Les intérêts d'une montée en température rapide du liquide de refroidissement sont les suivants :

- Amélioration des capacités de dégivrage des vitres.
- Diminution de la pollution.
- Réduction des pertes par frottement par diminution de la viscosité de l'huile.



1. Arrivée d'eau depuis le radiateur
2. Tige
3. Ressort
4. Capsule
5. Cire (cire de pétrole + poudre de cuivre)
6. Ressort
7. By-pass (l'eau vient du bloc culasse)
8. Départ d'eau vers la pompe à eau

Moteur froid : A fermé; B ouvert.

Moteur chaud : A ouvert; B fermé.

Fig. 8.4. Thermostat à double effet

Les thermostats utilisent des cires dilatables qui provoquent l'ouverture du circuit d'eau en direction du radiateur au-dessus d'une température limite fixée par le constructeur.

Pour augmenter le débit d'eau dans le moteur pendant la montée en température de ce dernier (thermostat fermé), on peut utiliser un thermostat à double effet :

- Moteur froid :
  - le passage vers le radiateur est fermé,
  - le passage vers un circuit de by-pass est ouvert.
- Moteur chaud :
  - le passage vers le circuit de by-pass est fermé et tout le débit passe par le radiateur.

On peut trouver le thermostat à l'entrée du moteur ou à la sortie de la culasse.

### 3.3.1. Thermostat en sortie culasse

Lorsque la température de l'eau atteint le seuil d'ouverture du thermostat (de l'ordre de 88°C), celui-ci commence à s'ouvrir. L'eau chaude pénètre dans le radiateur et de l'eau froide entre dans le moteur. Cette eau froide va devoir traverser tout le moteur avant d'atteindre à son tour le thermostat.

### 3.3.2. Thermostat en entrée moteur

Dans ce cas, le thermostat est implanté juste en amont de la pompe. L'information température culasse est apportée par un by-pass dont la présence est indispensable. Le bulbe du thermostat lit la température du mélange (eau retour radiateur + eau arrivée by-pass).

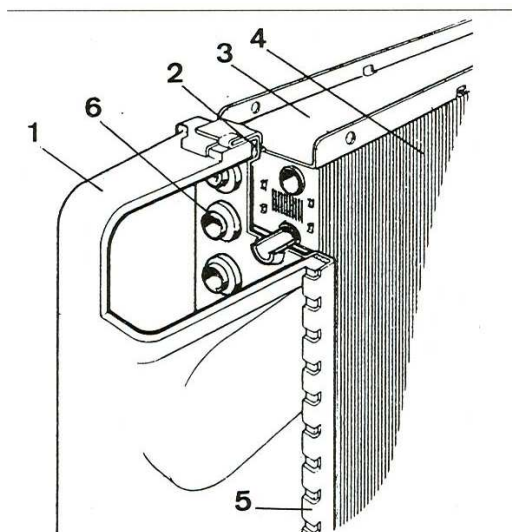
L'ouverture du circuit en provenance du radiateur aura lieu quand la température culasse atteindra l'indexation du thermostat (de l'ordre de 83°C).

## 3.4. Le radiateur

Le radiateur est un échangeur de chaleur eau/air utilisé pour abaisser la température du liquide de refroidissement.

les trois parties essentielles qui constituent le radiateur sont :

- Les tubes;
- Les ailettes;
- Les boîtes à eau.



1. Boîte à eau plastique
2. Joint caoutchouc d'étanchéité
3. Joue
4. Faisceau (ailettes)
5. Collecteur
6. Joint d'étanchéité de pied de tube

Fig. 8.5. Radiateur à tubes ronds et ailettes

### 3.5. Les ventilateurs

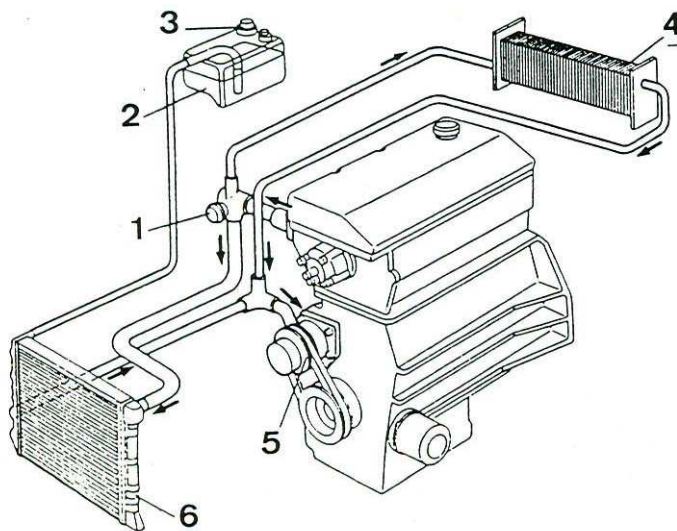
L'air refroidisseur est forcé à travers le radiateur :

- Par l'avancement du véhicule (effet dynamique).
- Par un ventilateur dans les cas où l'effet dynamique est insuffisant (véhicule à l'arrêt, moteur en fonctionnement; embouteillages; montagne; ...).

### 3.6. Le vase d'expansion

Lors de l'échauffement du moteur, le liquide de refroidissement se dilate et la pression monte dans le circuit. Les variations de volume entre moteur froid et moteur chaud sont absorbées par le volume d'air situé à la partie supérieure du vase d'expansion.

Comme le tube d'arrivée se trouve en dessous du niveau de liquide, il n'y aura pas d'introduction d'air dans le circuit quand le liquide va refroidir et repasser en direction du moteur.



1. Thermostat
2. Vase d'expansion
3. Bouchon avec clapet taré à une certaine pression
4. Aérotherme
5. Pompe à eau
6. Radiateur

*Fig.8 6. Circuit du liquide de refroidissement avec dégazage par vase d'expansion*

### 3.7. Le liquide de refroidissement

Le liquide de refroidissement également appelé liquide de caloporteur est constitué d'eau, d'éthylène-glycol (antigel) et d'inhibiteur de corrosion.

La présence d'éthylène-glycol augmente la température d'ébullition et abaisse celle de congélation.

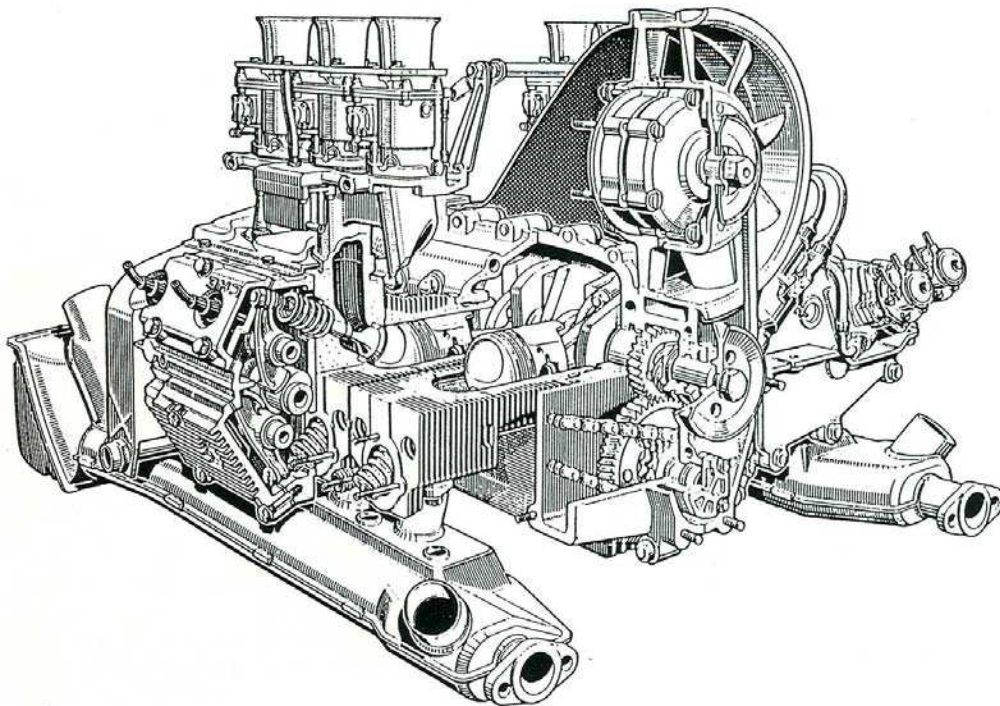
#### 4. Le refroidissement par air

Ce type de refroidissement encore beaucoup utilisé pour les motos est très rare en automobile.

Le coefficient de conductivité de l'air étant plus faible que celui de l'eau, les surface d'échange doivent être augmentées et le débit d'air être très important.

En pratique, cette surface est augmentée au moyen d'ailettes venues de fonderie au niveau des cylindres et de la culasse.

Pour les moteurs à poste fixe, le moteur est caréné avec des tôles et l'air est pulsé par une soufflante.



*Fig.8.7. Moteur Porsche type 911 à refroidissement par air*

## SYSTEME D'ALIMENTATION

### 1. Généralités

Le système d'alimentation a pour rôle d'amener au niveau du moteur l'air et l'essence nécessaires à une bonne combustion.

Le circuit d'alimentation comprend deux circuits différents :

- circuit d'alimentation en air;
- circuit d'alimentation en essence.

Pour réaliser le mélange deux solutions sont utilisées :

- Système à carburateur : le mélange air-essence est obtenu dans le carburateur puis introduit dans le cylindre de moteur.
- Système d'injection : le mélange est réalisé dans la pipe d'admission, l'air est acheminé par voie classique et l'essence est injectée sous pression par des injecteurs (un par cylindre).

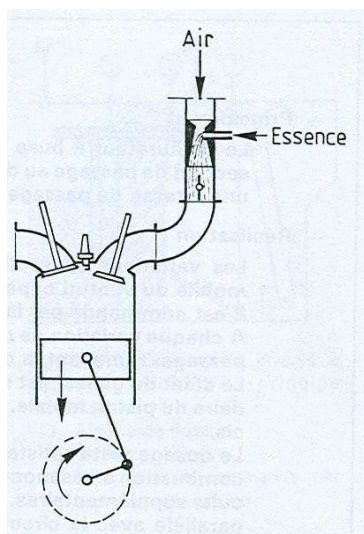


Fig. 9.1. Carburation par carburateur

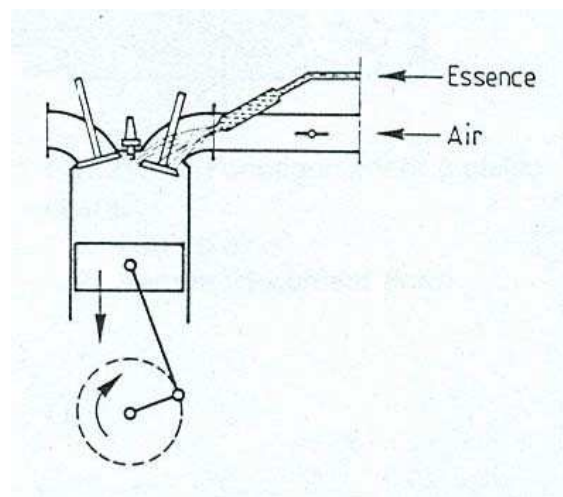


Fig.9.2. Carburation par injection

### 2. Système à carburateur

#### 2.1. La carburation

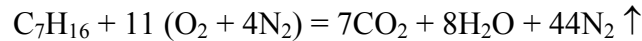
La carburation est l'ensemble des opérations réalisant le mélange intime du carburant avec l'air dans des proportions précises afin d'obtenir une combustion rapide et complète.

Pour réaliser la carburation, il est nécessaire d'effectuer des opérations suivantes : dosage, vaporisation et homogénéité.

### 2.1.1. Dosage

C'est la proportion de la quantité de carburant par rapport à l'air.

Prenons le cas de la combustion de l'essence  $C_7H_{16}$  (*Heptane hydrocarbure*) et reportons-nous à l'équation chimique de combustion de ce carburant, nous trouvons :



Si nous admettons que l'essence utilisée est uniquement composée d'heptane et que l'air ambiant contient en masse 23% d'oxygène.

Connaissant la masse atomique de chaque corps :

carbone = 12, hydrogène = 1 et oxygène = 16,

On a :  $(12 \times 7) + 16 = 100$  g d'heptane brûlent  
dans  $(22 \times 16) = 352$  g d'oxygène.

Ces 352 g d'oxygène étant contenus dans  $\frac{352 \times 100}{23} = 1530$ g d'air.

Nous constatons qu'il faut 15.3 g d'air pour faire brûler 1 g d'essence. Ce dosage constitue le dosage parfait.

Un mélange comportant un dosage de moins de 15.3 g d'air pour un gramme d'essence est appelé mélange riche; s'il comporte plus de 15.3 d'air nous le nommerons mélange pauvre.

Le mélange est incombustible si le dosage essence/air est en dessous de 1/28 ainsi qu'au-dessus de 1/8.

La puissance maximale de moteur est obtenue avec un dosage de 1/12.5.

### 2.1.2. Vaporisation

C'est le processus de transformation de carburant de l'état liquide en état gazeux pour mélanger avec l'oxygène de l'air.

### 2.1.3. Homogénéité

Chaque molécule de carburant devant, pour brûler, être entourée des molécules d'oxygène.

L'homogénéité est réalisée par un brassage du mélange dans les tubulures d'admission et se terminant dans la chambre de combustion au moment de la compression.

## 2.2. Alimentation en air

Pour avoir une combustion correcte le rapport essence/air doit valoir 1/15 en masse, mais 1/9000 en volume.

On conçoit aisément la nécessité de filtrer une telle quantité d'air. Ceci afin d'éviter l'entrée de poussières et particules abrasives qui pourraient détériorer les parties mobiles du moteur.

Le filtre à air à deux rôles :

- La boîte à air sert de silencieux à l'aspiration en limitant le sifflement.
- La cartouche (filtre) sert de retenir les impuretés de l'air aspiré par le moteur.

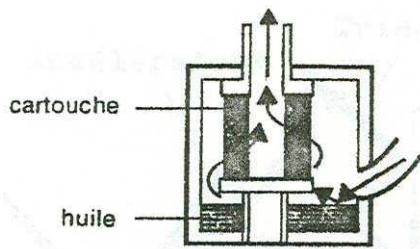


Fig. 9.3. Filtre à air à bain d'huile

Pour les pays dont l'air contient des poussières particulièrement néfastes on utilise un filtre à air à bain d'huile.

L'air aspiré est contraint de changer brusquement de direction à proximité de la surface de l'huile.

Les poussières par l'inertie, continuent tout droit et tombent dans l'huile.

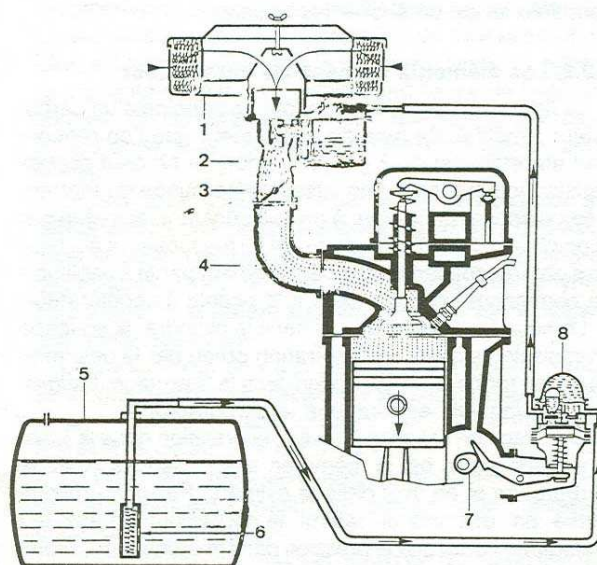
Un filtre à air encrassé freine l'entrée d'air et gêne le remplissage du moteur. Il s'ensuit une augmentation de la consommation d'essence et des imbrûlés. Il est donc indispensable de le nettoyer ou de la changer périodiquement.

## 2.3. Alimentation en carburant

### 2.3.1. Circuit complet

Le circuit complet d'un système d'alimentation en carburant comprend :

- le réservoir : pour contenir un volume d'essence.
- la pompe à essence : aspire l'essence dans le réservoir et remplit la cuve du carburateur.
- le carburateur : réalise le mélange air-essence.
- le filtre à air : assure l'alimentation du carburateur en air propre.



1. Filtre à air
2. Carburateur
3. Papillon des gaz
4. Collecteur d'admission
5. Réservoir de carburant
6. Filtre à carburant
7. Excentrique sur arbre à cames
8. Pompe mécanique d'alimentation en carburant

Fig. 9.4. Système d'alimentation d'un moteur

### 2.3.2. Pompe à essence

Il existe deux types de pompes :

- la pompe à entraînement mécanique : très répandue sur les moteurs à carburateur.
- la pompe électrique : sur les véhicules à injection et haut de gamme.

#### a) Pompe à essence mécanique

C'est une pompe aspirante-refoulante très généralement commandée par une came spéciale de l'arbre à cames, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un poussoir.

Elle comporte : une membrane (M), un clapet d'aspiration (1), un clapet de refoulement (2), un levier de commande (L) actionné par la came et maintenu contre elle par un ressort (r), un ressort taré (R) de pression d'essence et un filtre (F) tamis métallique.

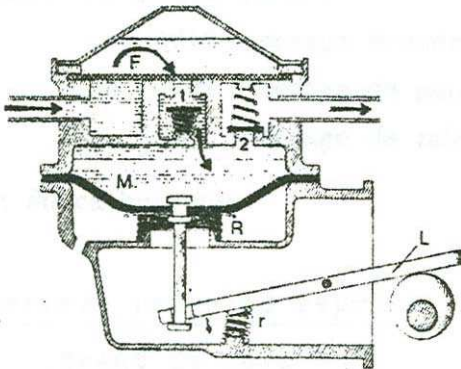


Fig.9.5.Pompe à membrane (aspiration)

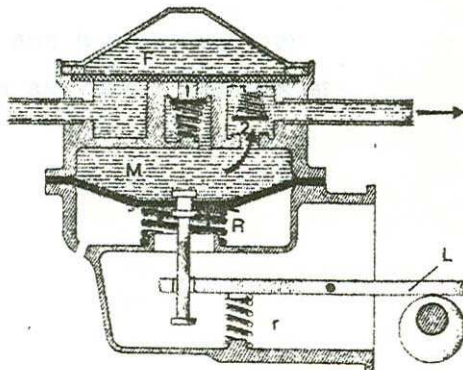


Fig.9.6.Pompe à membrane (refoulement)

#### Aspiration :

La membrane (M) est tirée vers le bas par le levier de commande (L) actionné par la came. La descente de la membrane (M) crée une dépression qui ouvre le clapet d'aspiration (1) et aspire l'essence. Le ressort taré (R) est comprimé.

#### Refoulement :

La came ayant tourné, le refoulement est alors réalisé grâce au ressort taré (R) qui, appuyant avec une force déterminée sur la membrane (M), engendre la pression de refoulement : **la pression d'essence**. Cette dernière ouvre le clapet de refoulement (2).

### b) Pompe à essence électrique

On a rencontré plusieurs types de pompe à essence électrique :

- Pompe à membrane : la commande mécanique est remplacée par un système magnétique de bobinage.
- Pompe à engrenage entraînée par un moteur électrique à courant de batterie.
- Pompe rotative à galets entraînée également par un moteur électrique à aimants permanents.

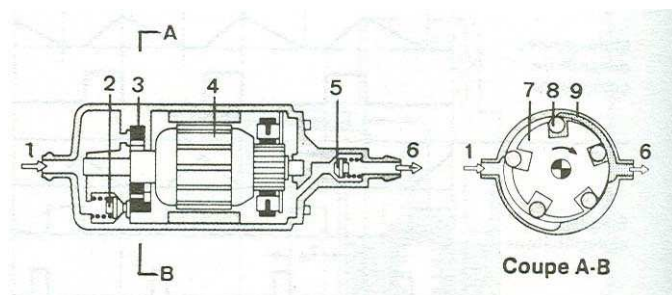


Fig. 9.7. Pompe à carburant Bosch

1. Aspiration
2. Limiteur de pression
3. Pompe multicellulaire à rouleaux
4. Induit du moteur
5. Clapet de non-retour
6. Refoulement
7. Rotor
8. Rouleau
9. Surface de guidage des rouleaux

### c) Avantages de la pompe électrique

- On peut la placer où l'on veut sur le moteur.
- Elle entre en action dès l'établissement du contact avec la clé.
- Située dans un endroit frais (par exemple dans le réservoir) elle évite les phénomènes de percolation.

### 2.3.3. Carburateurs

#### a) Description du carburateur

Le rôle de carburateur est de réaliser le mélange de l'air et de l'essence dans des conditions permettant une carburation correcte à tous les régimes du moteur.

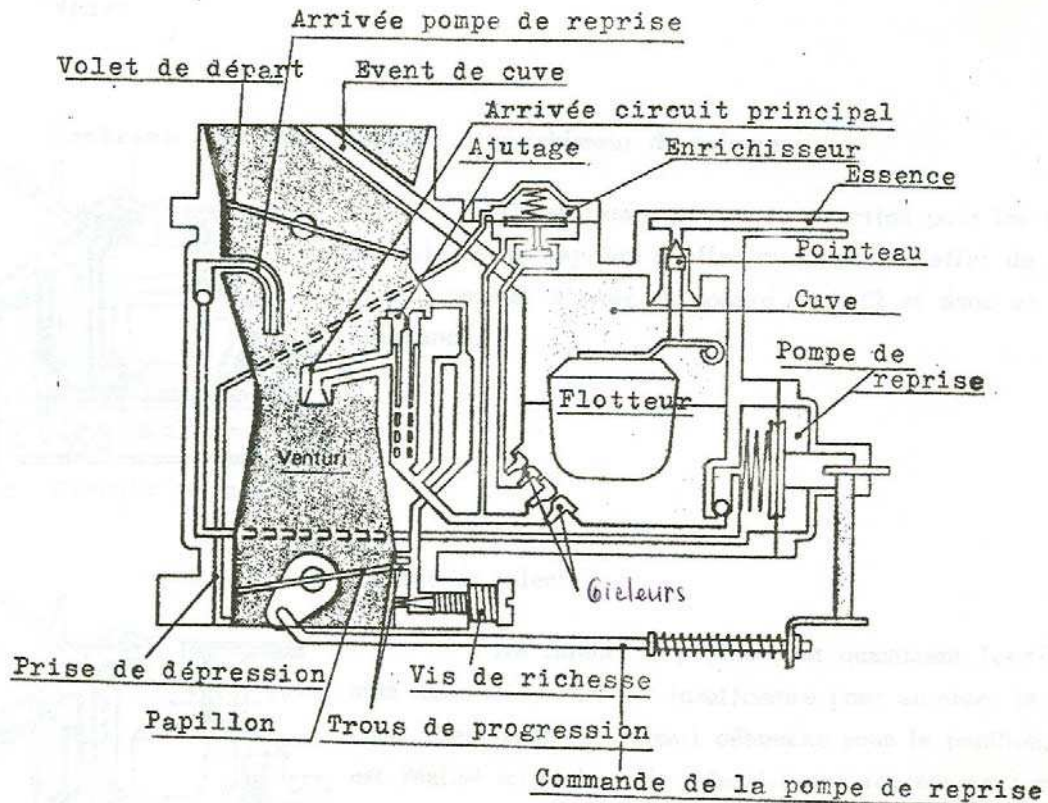


Fig. 9.8. Circuits internes du carburateur

### b) Circuit d'alimentation

Pour réaliser le mélange l'air circule dans le corps du carburateur de l'amont vers l'aval. Le mélange s'effectue dans une zone appelée chambre de carburation (venturi). Le giclage de l'essence est limité par un gicleur principal.

Une réserve appelée cuve à niveau constant est munie d'un dispositif constitué d'un robinet pointeau actionné par un flotteur.

L'essence est amenée du réservoir par une pompe sous une légère pression. Lorsque l'essence est au niveau désiré dans la cuve, le flotteur en montant actionne le pointeau qui obture l'arrivée.

Dès qu'il y a consommation de carburant, le pointeau s'ouvre jusqu'à obtention du niveau requis.

Un trou de mise à l'air libre de la cuve permet à l'essence de s'écouler grâce à l'action de la pression atmosphérique.

### c) Circuit de ralenti

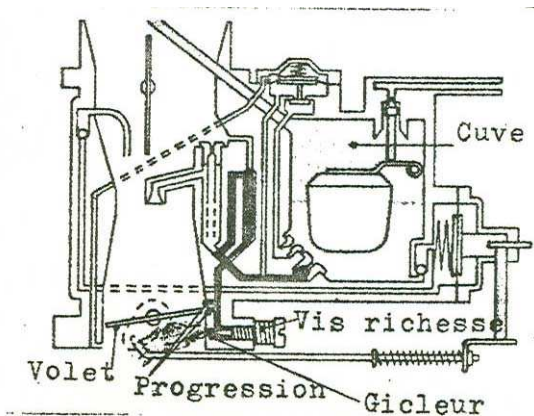


Fig.9.9. Circuit de ralenti

Au ralenti le papillon est quasiment fermé, la dépression dans le venturi est insuffisante pour amorcer le circuit principal. Le circuit de ralenti débouche sous le papillon, le dosage est réalisé par un gicleur de ralenti (non présenté) pour l'essence et par l'entrebâillement du papillon pour l'air.

### d) Circuit principal

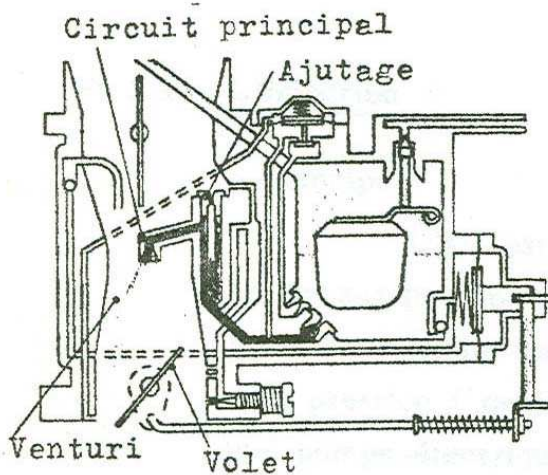


Fig. 9.10. Circuit principal

A une certaine ouverture de papillon, dans le diffuseur on a une augmentation de la dépression qui amorce le circuit principal. L'essence passe des cuves aux puits à travers le gicleur principal qui en contrôle le débit. Dans les puits on a un premier mélange, réalisé dans les tubes d'émulseurs, avec l'air contrôlé par le gicleur d'air. Des puits le mélange arrive au venturi où commence la carburation avec l'air aspiré par les conduits d'admission. Le circuit principal assure un dosage économique de l'ordre 1/18 aux moyens régimes.

### e) Circuit de pompe de reprise

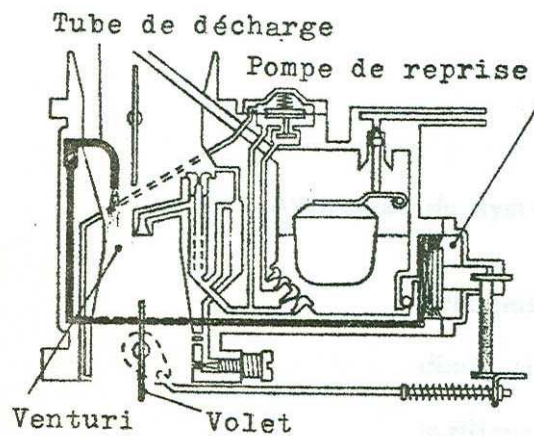


Fig. 9. 11. Circuit de reprise

Lors d'une brusque accélération, le papillon s'ouvre très rapidement ce qui provoque un fort appel d'air et d'essence, mais du fait de la différence de densité l'arrivée d'essence est retardée. Le mélange risque de devenir pauvre, il faut l'enrichir. C'est le rôle de la pompe de reprise; actionnée mécaniquement par la commande du papillon elle envoie un surplus d'essence à chaque accélération.

### f) Circuit d'enrichissement de puissance

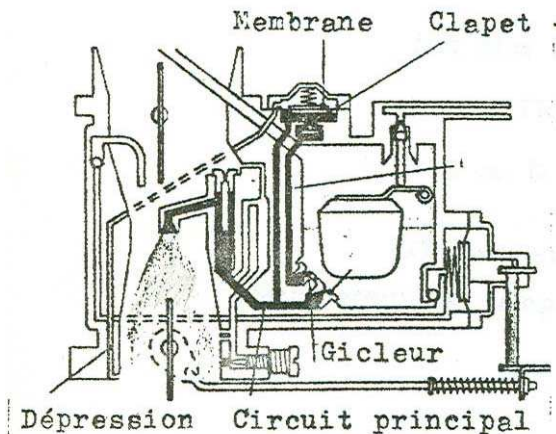


Fig.9.12. Circuit d'enrichissement de puissance

Ce système qui entre en action pour les grandes ouvertures de papillon permet d'avoir un dosage de 1/12 et donc un gain en puissance.

Dans des conditions bien déterminées de charge et régime (effet du ressort > effet de la dépression) le gicleur d'enrichissement ajoute son débit à celui du circuit principal.

L'ouverture de ce gicleur est commandée par un clapet à membrane actionné par la dépression régnant dans la tubulure d'admission.

### 3. Les dispositifs antipollution

D'après le résultat de la transformation chimique du mélange air/essence au moment de la combustion nous trouvons des compositions des gaz brûlés suivants:

- dioxyde de carbone ou gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) : non toxique,
- vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ),
- Azote ( $\text{N}_2$ ).

La combustion n'étant pas toujours correctement réalisée nous avons noté l'apparition de divers gaz plus ou moins polluants ou toxiques qui sont notamment :

- monoxyde ou oxyde de carbone ( $\text{CO}$ ),
- hydrocarbures imbrûlés (CH),
- oxydes d'azote ( $\text{N}_x\text{O}_y$ ).

On constate que les taux de CO et de HC augmentent si :

- la richesse du mélange est trop importante par rapport au besoin instantané du moteur,
- le brassage du mélange n'est pas correctement effectué (homogénéité),
- la vaporisation n'est pas complète,
- la vitesse de combustion n'est pas adaptée à la vitesse de rotation du moteur,
- le point d'allumage n'est pas déclenché au moment opportun,
- la forme de la chambre de combustion est mal dessinée.

Pour lutter contre la pollution les dispositifs utilisés visent à :

- Améliorer la combustion
  - en agissant sur la préparation du mélange,
  - en maintenant une température constante du moteur,
  - en produisant un allumage à haut pouvoir calorifique déclenché à des moments précis;
- Limiter les évaporations diverses par le recyclage des vapeurs d'huile et de carburant;
- Traiter les gaz d'échappement
  - par post-combustion,
  - par catalyse;
- Utiliser des carburants ayant une faible teneur en soufre, plomb et résidus.

#### 4. **Système d'injection**

##### 4.1. Principe de fonctionnement

L'injection d'essence consiste à introduire l'air par une tubulure d'admission de forte section et à injecter le carburant en amont plus près de la soupape d'admission (injection directe) ou directement dans le cylindre (injection directe). L'injection peut être continue ou discontinue, mécanique ou électronique.

##### 4.2. Avantages du système d'injection

- L'augmentation des performances du moteur (couple, puissance,...).
- Economie de carburant grâce au dosage très précis.
- Diminution des émissions toxiques (meilleure combustion).
- Meilleur remplissage en air des cylindres donc souplesse accrue.

##### 4.3. Différents systèmes d'injection

On peut classer les systèmes d'injection selon l'endroit où se fait l'injection du carburant dans l'air aspiré par le moteur :

- l'injection est directe si elle s'effectue dans la chambre de combustion du cylindre.
- L'injection est indirecte si elle a lieu dans la tubulure d'admission, plus ou moins près de la soupape d'admission, le jet d'essence étant dirigé vers la soupape.

- L'injection centralisée si elle se fait dans la partie du collecteur commune à tous les cylindres, à l'endroit qu'occuperait un carburateur.

On peut également différencier les systèmes d'injection par le dispositif de régulation :

- Dans l'injection mécanique, la pompe entraînée mécaniquement par le moteur, effectue la mise en pression du carburant et dose le volume injecté.
- Dans l'injection électronique, la pompe électrique, effectue l'alimentation du carburant sous pression; les fonctions de dosage, régulation, injection sont totalement ou partiellement pilotées par une centrale électronique.

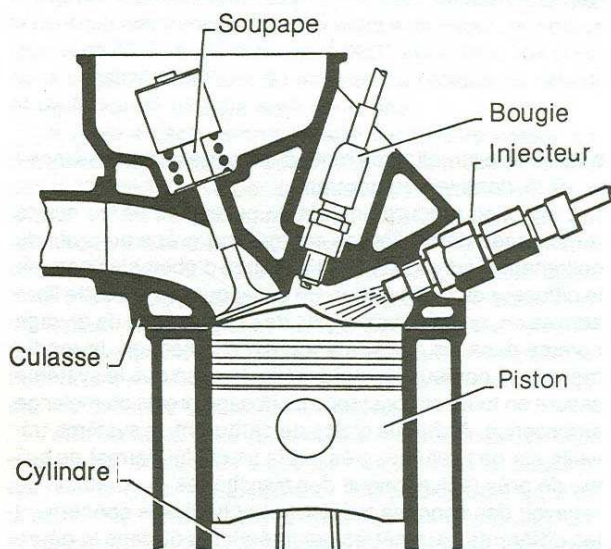


Fig. 9.13. Injection directe

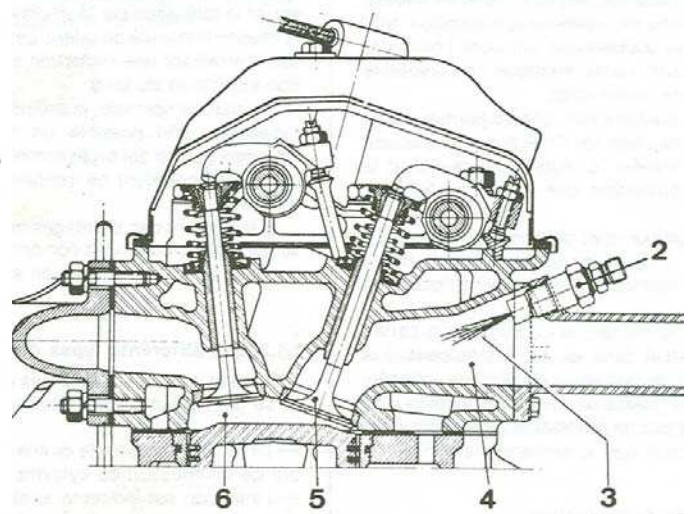


Fig. 9.14. Injection indirecte

Les plus répandus actuellement sont les systèmes Bosch :

- K-Jetronic : injection mécanique continue indirecte.
- L ou D-Jetronic : injection électronique discontinue indirecte.

#### 4.3.1. Principe de l'injection K-Jetronic

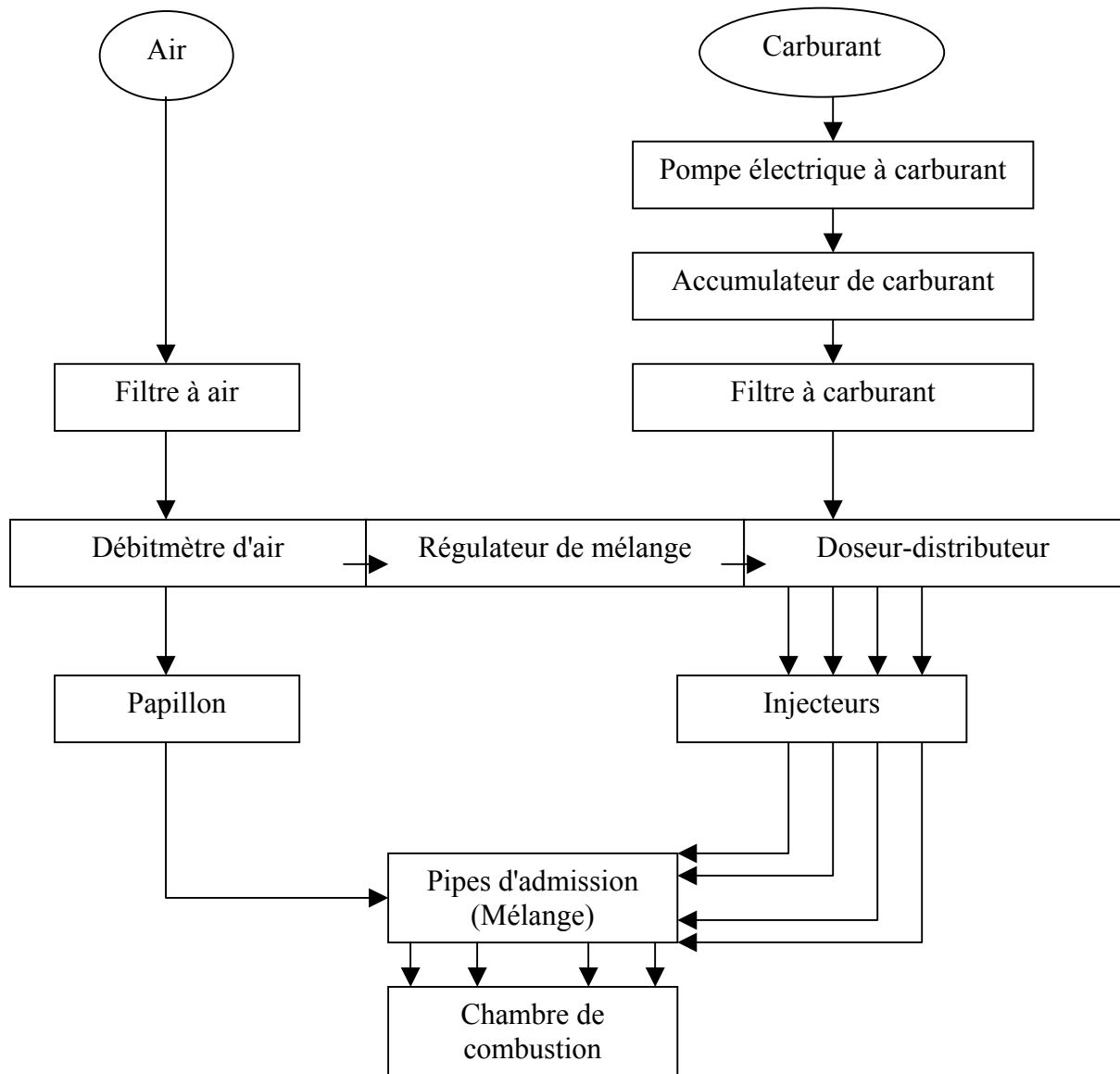
L'air est dosé par un papillon placé dans la tubulure d'admission. Le carburant est calibré par un doseur dont le tiroir est commandé par le déplacement du débitmètre d'air placé dans la tubulure d'admission.

Le doseur reçoit le carburant d'une pompe électrique par l'intermédiaire d'un régulateur de pression.

Les injecteurs débitent en permanence un carburant dont la pression et le débit sont déterminés par le débit de l'air et sa pression absolue ( $\approx 4.6$  bars).

Pour le départ à froid, un électro-injecteur unique injecte un supplément de carburant à l'entrée du collecteur d'admission.

*Schéma de principe du système K-Jetronic*



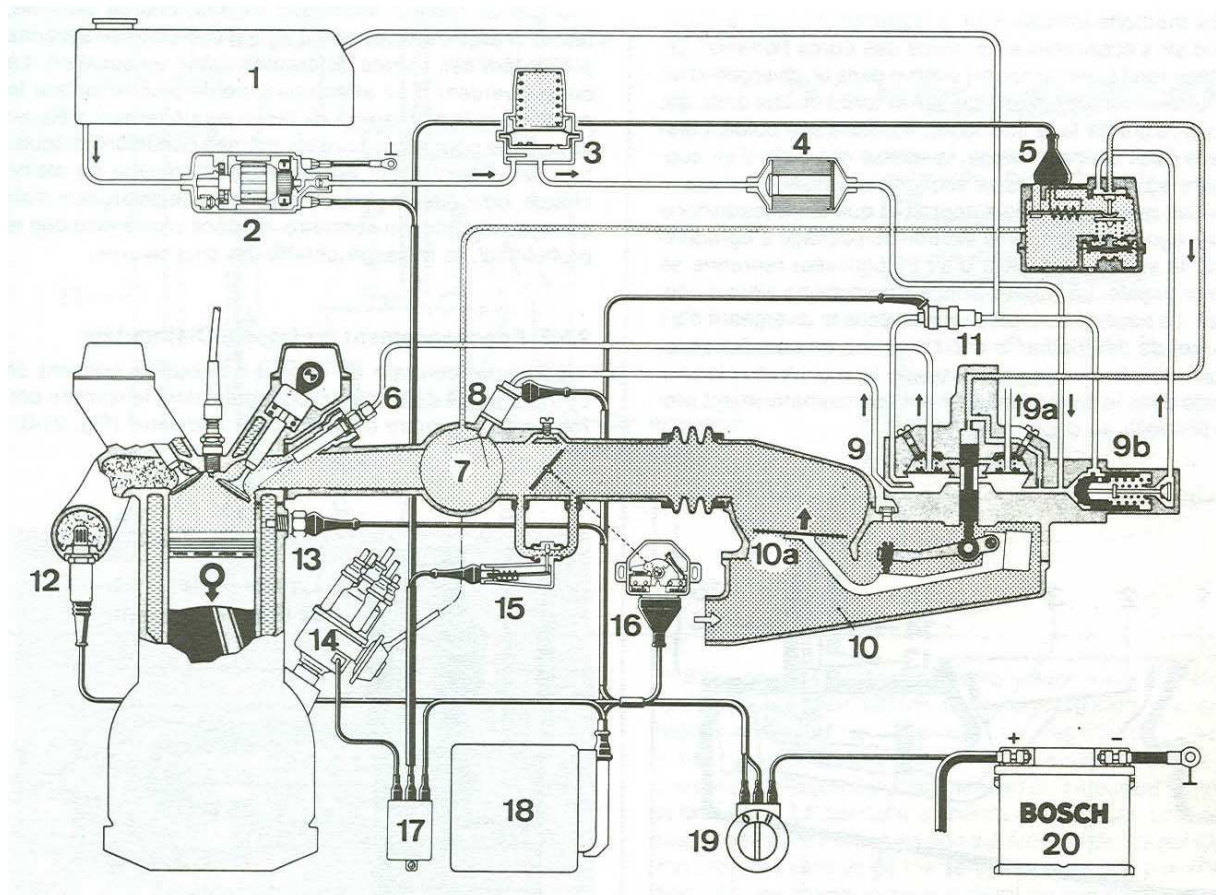


Fig. 9.15. Schéma de l'installation du système K-Jetronic

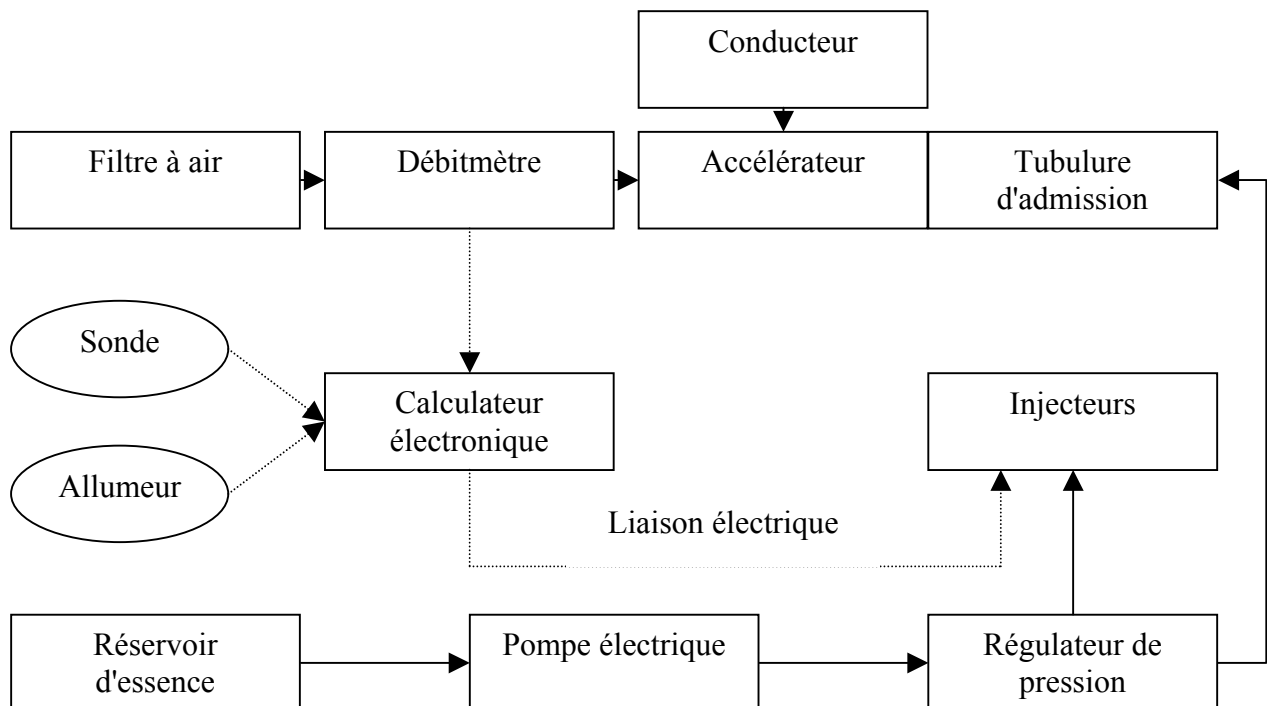
- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1. Réservoir à carburant                  | 10. Débitmètre d'air                  |
| 2. Pompe électrique à carburant           | 10a. Plateau-sonde                    |
| 3. Accumulateur de carburant              | 11. Electrovanne de cadence           |
| 4. Filtre à carburant                     | 12. Sonde Lambda                      |
| 5. Correcteur de réchauffage              | 13. Thermocontact temporisé           |
| 6. Injecteur                              | 14. Allumeur                          |
| 7. Collecteur d'admission                 | 15. Commande d'air additionnel        |
| 8. Injecteur de départ à froid            | 16. Contacteur de papillon            |
| 9. Régulateur de mélange                  | 17. Relais de commande                |
| 9a. Doseur-distributeur de carburant      | 18. Centrale de commande électronique |
| 9b. Régulateur de pression d'alimentation | 19. Commutateur d'allumage-démarrage  |
|   | 20. Batterie                          |

#### 4.3.2. Principe de l'injection L-Jetronic

Le débit de l'air est dosé par un papillon et mesuré par un débitmètre à potentiomètre placé dans la tubulure d'admission.

Le calculateur reçoit des informations sous forme de signaux électriques sur : le débit, la pression et la température de l'air, la température de l'eau, le déclenchement de l'allumage, la vitesse d'ouverture du papillon, la vitesse de rotation du moteur. Il transforme ces informations en une tension de commande des injecteurs électromagnétiques, dont le début, la durée et la fin d'injection sont fonction des paramètres d'entrée.

*Schéma de principe du système L-Jetronic*



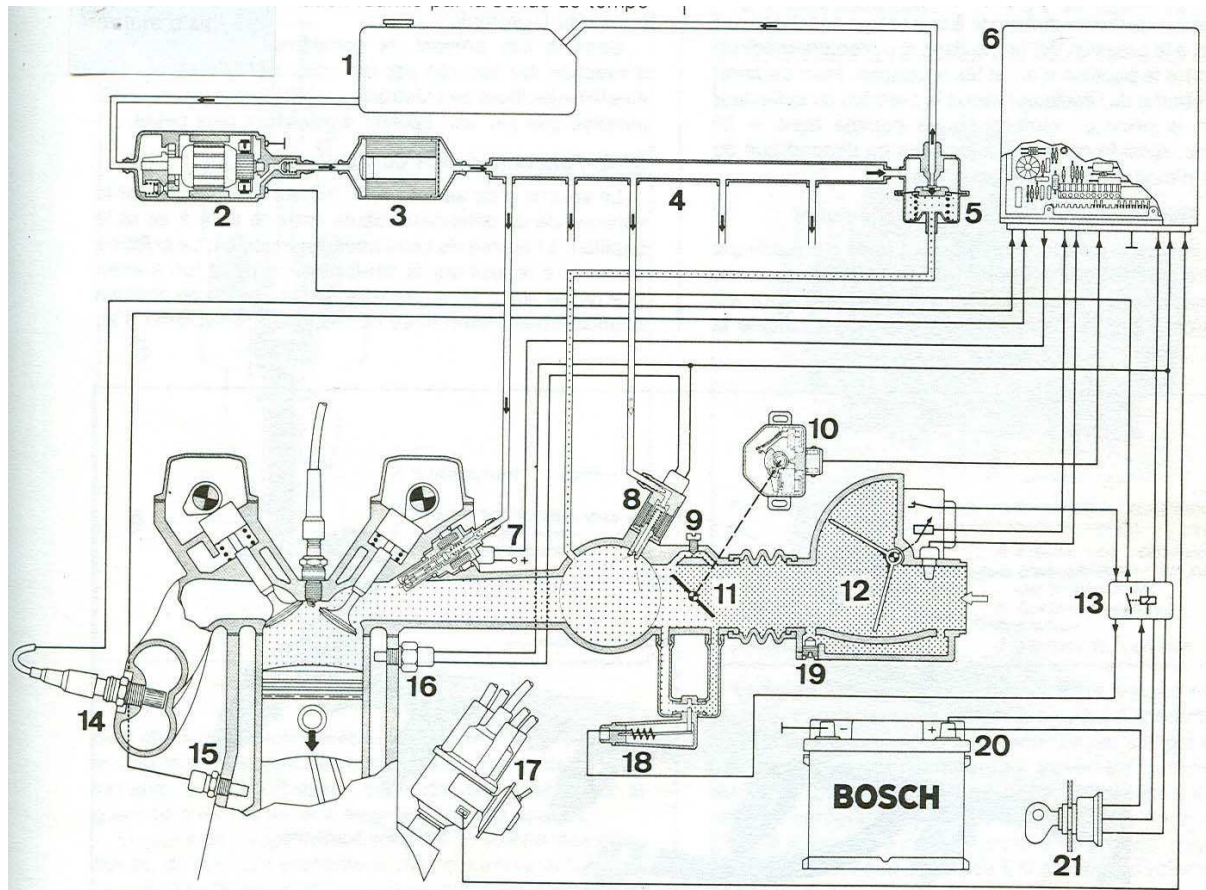


Fig. 9.16. Schéma du système L-Jetronic

- |  |  |
|--|--|
| 1. Réservoir de carburant                  | 11. Papillon                                 |
| 2. Pompe électrique à carburant            | 12. Débitmètre d'air                         |
| 3. Filtre à carburant                      | 13. Ensemble de relais                       |
| 4. Rampe de distribution                   | 14. Sonde lambda                             |
| 5. Régulateur de pression                  | 15. Sonde de la température du moteur        |
| 6. Appareil de commande électronique       | 16. Thermocontact temporisé                  |
| 7. Injecteur                               | 17. Allumeur                                 |
| 8. Injecteur de départ à froid             | 18. Commande d'air additionnel               |
| 9. Vis de réglage de la vitesse du ralenti | 19. Vis de réglage de la richesse de ralenti |
| 10. Contacteur de papillon                 | 20. Batterie                                 |
|  | 21. Commutateur d'allumage/démarrage         |

## SYSTEME D'ALLUMAGE

### 1. Introduction

#### 1.1. Fonction de l'allumage

La fonction de l'allumage est de produire un apport de chaleur dont l'énergie soit suffisante pour déclencher l'inflammation du mélange gazeux en fin de compression.

Cette inflammation est obtenue par la création d'un arc électrique.

#### 1.2. Création de l'arc électrique

La tension minimale nécessaire à l'amorçage de l'arc est d'environ 15 000 V, pour obtenir une telle tension on fait appel à un transformateur de tension : la bobine d'allumage.

##### *Principe de fonctionnement*

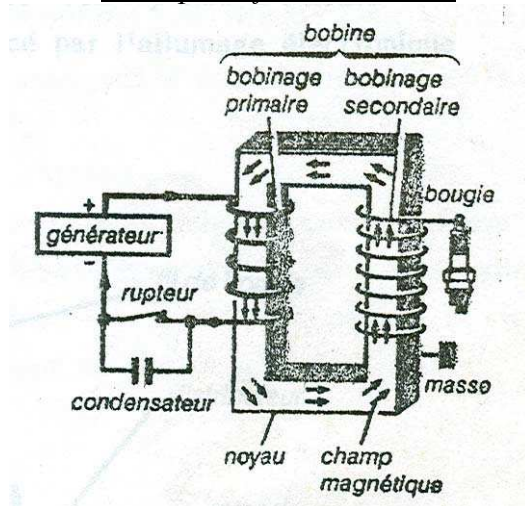


Fig. 10.1. Phase d'induction

Lorsque le rupteur est fermé, le courant circule dans le bobinage primaire et crée un champ magnétique dans l'enroulement secondaire.

C'est la phase induction.

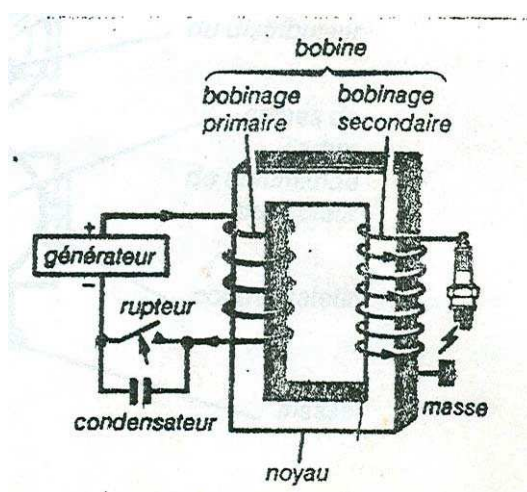


Fig. 10.2. Phase d'allumage

A l'ouverture du rupteur, le courant primaire est brusquement coupé, ceci provoque une variation rapide du champ magnétique et la création d'un courant induit à haute tension dans l'enroulement secondaire.

L'enroulement secondaire est lié à la bougie qui déclenche l'étincelle désirée.

Le condensateur placé en dérivation du rupteur absorbe le courant de self induit dans le primaire lors de la coupure et évite la détérioration des contacts du rupteur.

### 1.3. Différents types d'allumage

On rencontre deux systèmes d'allumage :

- L'allumage autonome par volant magnétique.
- L'allumage par batterie.

Pour chacun de ces systèmes deux solutions technologiques sont utilisées pour l'ouverture du circuit primaire :

- Ouverture par rupteur mécanique : allumage classique.
- Ouverture par interrupteur électronique : allumage électronique.

## 2. L'allumage classique par batterie

L'allumage par batterie est encore utilisé à l'heure actuelle, mais il est de plus en plus remplacé par l'allumage électronique plus performant et plus fiable.

### 2.1. Principe de fonctionnement

L'allumage commandé classique par rupteur, bobine haute tension et batterie se présente sous la forme de la figure ci-dessous.

Un enroulement primaire est couplé électromagnétiquement, pour constituer un transformateur de tension appelé bobine, à un enroulement secondaire placé dans un circuit haute tension comportant un entrefer d'éclatement porté généralement par une bougie.

Dans le système d'allumage classique, les coupures intermittentes sont réalisées par un rupteur, placé sur la ligne de retour à la masse du bobinage. Son ouverture et sa fermeture sont provoqués par une came. Le rupteur et l'arbre porte-cames sont des éléments de l'allumeur. L'arbre d'allumeur tourne à demi-vitesse du vilebrequin puisqu'il doit se produire une étincelle tous les deux tours de vilebrequin.

Au moment où le circuit primaire se ferme au rupteur, le courant s'établit progressivement et lorsqu'il s'ouvre, ce courant se trouve alors dérivé vers le condensateur branché aux bornes du rupteur.

Le condensateur va se charger ce courant du self puis se décharge aussitôt. La variation brutale du flux dans le circuit primaire provoque la naissance d'un courant haute tension dans l'enroulement secondaire puis la distribuer vers la bougie intéressée.

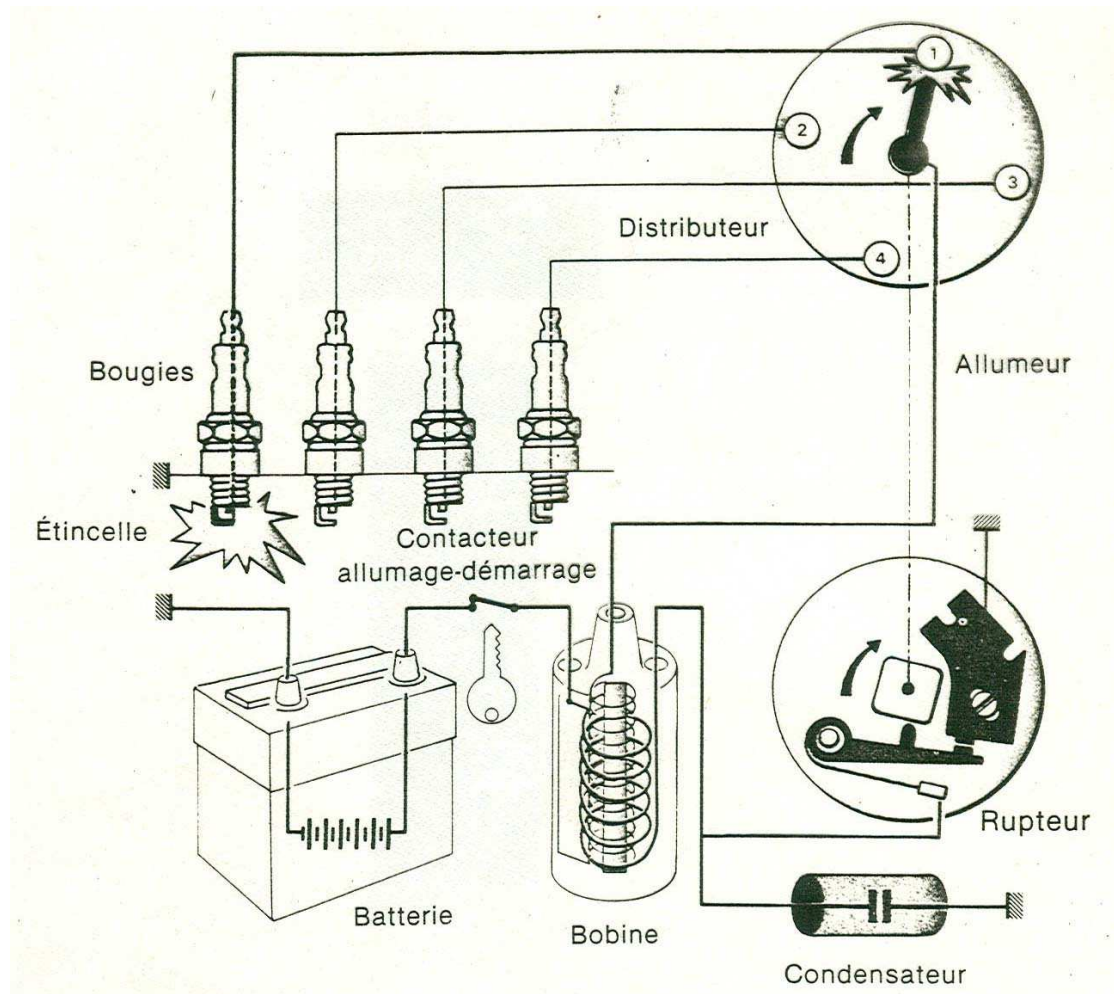


Fig. 10.3. L'allumage par batterie

## 2.2. Les organes de l'allumage classique

La source d'électricité étant la batterie accumulateur, le dispositif d'allumage classique mécanique est constitué de trois organes distincts :

- L'allumeur-distributeur, comprenant lui-même le rupteur, le condensateur, le système d'avance centrifuge et à dépression et enfin le doigt de distributeur (tête de distribution),
- La bobine haute tension,
- La bougie, une par cylindre.

### 2.2.1. L'allumeur

Il se compose de quatre parties essentielles : l'entraînement, le circuit basse tension, les systèmes d'avance centrifuge et à dépression, le circuit haute tension.

Le mouvement de rotation de l'arbre de l'allumeur est réalisé mécaniquement à partir de l'arbre à cames du moteur.

Cet arbre de commande entraîne, à sa partie supérieure, un plateau portemasselottes d'avance centrifuge serti. L'arbre porte-came, centré sur la partie supérieure de l'arbre de commande, est commandé en rotation à partir des masselottes centrifuges, de façon que la came puisse se décaler angulairement par rapport à l'arbre de commande. Ce calage angulaire représente, en fonction du régime, la courbe d'avance centrifuge de l'allumeur.

A la hauteur de la came, le plateau porte-rupteur est fixé sur le corps quand l'allumeur ne comporte pas de système d'avance par dépression, ou peut pivoter autour du corps quand il est muni d'un tel système. L'écartement des contacts du rupteur est réglable par la vis de fixation du contact fixe.

A la partie supérieure de la came, le rotor disrupteur est clipsé pour tourner dans la tête de distribution, à la hauteur des plots haute tension d'alimentation des bougies par l'intermédiaire des fils haute tension. La tête de distribution comporte les bornes haute tension de distribution en regard des plots vers les bougies, et une borne haute tension centrale reliée à celle de la bobine d'allumage.

La haute tension est connectée au rotor disrupteur au moyen d'un petit charbon et d'un ressort.

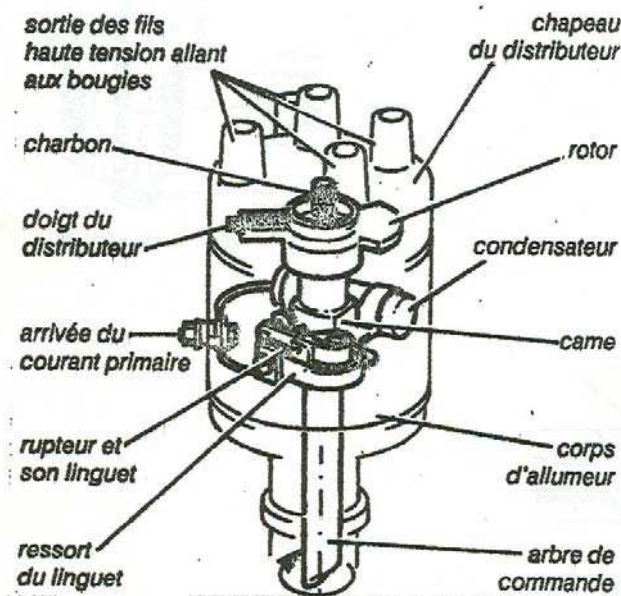


Fig. 10.4. Allumeur classique

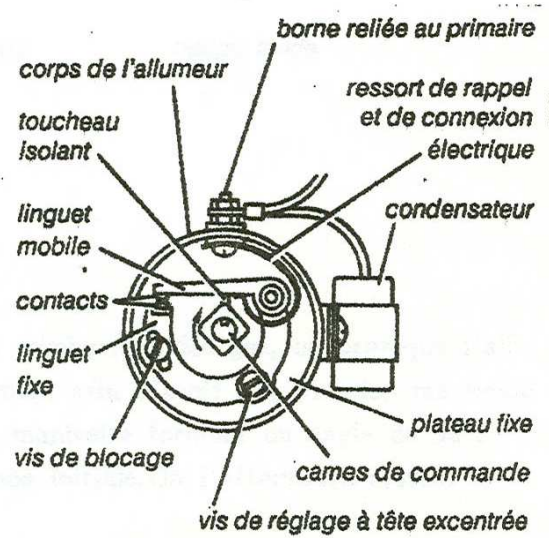


Fig. 10.5. Allumeur à rupteur pour moteur 4 cylindres

### 2.2.2. La bobine



Fig. 10.6. Bobine d'allumage

La bobine contient le transformateur-élevateur de tension comprenant un noyau magnétique en tôles feuilletées autour duquel on trouve l'enroulement secondaire et l'enroulement primaire.

La bobine la plus répandue a la forme d'une boîte cylindrique en tôle emboutie.

A la partie supérieure, la tête de bobine isolante est sertie sur la boîte en tôle avec l'interposition de joints d'étanchéité. Elle supporte les deux bornes primaires, l'une d'entrée venant du contact d'allumage, l'autre de sortie allant vers l'allumeur, ainsi que la sortie haute tension montée dans une cheminée au centre.

Dans ce type de bobine verticale, les enroulements baignent dans l'huile afin de limiter leur échauffement.

### 2.2.3. La bougie d'allumage

Elle produit l'étincelle dans la chambre de combustion.

La haute tension est amenée par l'électrode centrale, l'arc se produit au passage du courant entre les deux électrodes (écartement des électrodes : 0.5 à 1 mm).

La bougie doit être parfaitement isolante et doit évacuer rapidement la chaleur afin d'éviter les phénomènes d'auto-allumage.

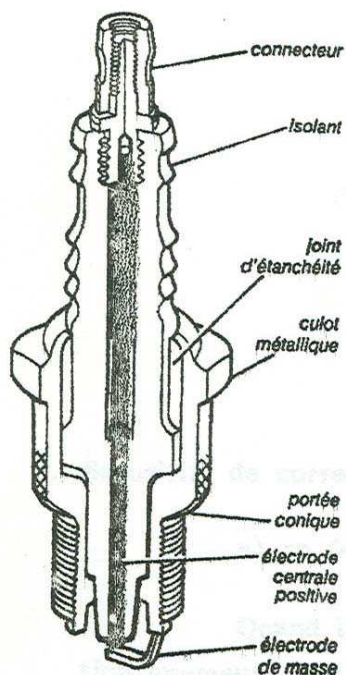


Fig.10.7. Bougie d'allumage

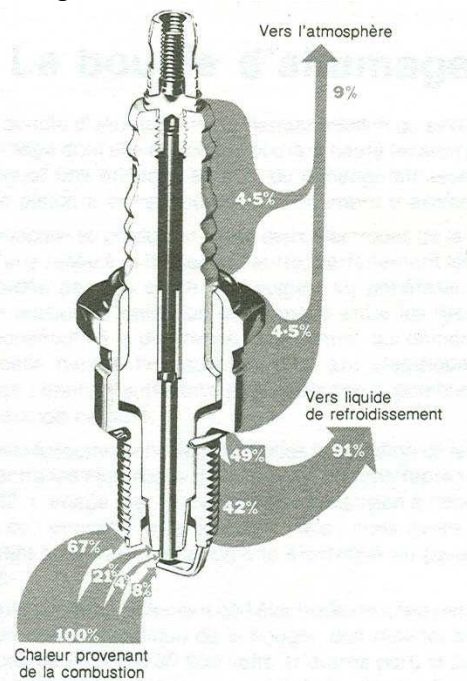


Fig.10.8. Echanges thermiques entre la bougie et son environnement

On classe les bougies selon leur pouvoir de refroidissement.

Le degré thermique de la bougie caractérise sa capacité de transférer la chaleur du bec de l'isolateur au système de refroidissement du moteur.

La bougie "chaude" transmet la chaleur moins rapidement. Son long bec d'isolateur oblige les calories de la pointe à parcourir un long chemin avant d'atteindre la partie de l'isolateur en contact avec le culot, puis la culasse.

La bougie "froide" transmet la chaleur plus rapidement grâce à son bec court.

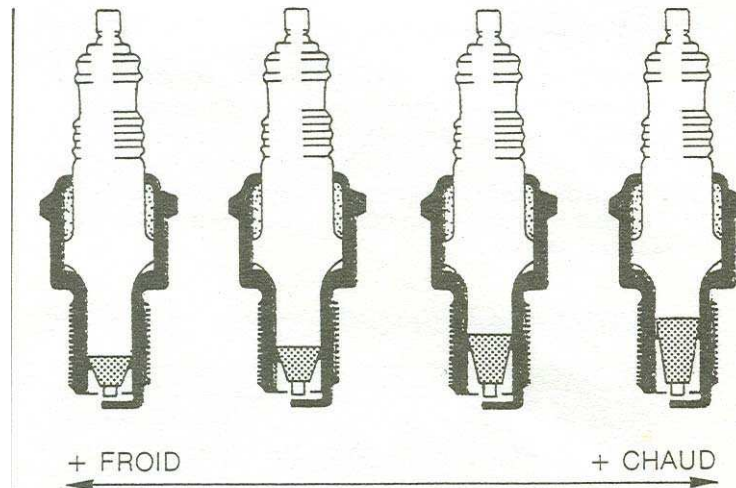


Fig. 10.9. Gamme thermique des bougies

### 3. Calage d'allumage

L'avance à allumage définit l'instant où commence l'allumage, considéré comme celui où s'ouvre le rupteur, par rapport à la position supérieure définie par le piston.

L'avance peut s'apprécier par un angle de rotation du vilebrequin.

On peut admettre que l'angle d'avance se compose de trois éléments :

- Une avance fixe résultant du calage initial du dispositif de déclenchement de l'allumage sur la rotation du moteur, cette avance fixe suffit en principe aux moteurs à régimes lents.
- Une avance variable dépendant de la vitesse de rotation, augmentant avec elle, mais non proportionnellement.
- Une correction de cette avance en fonction de la charge supportée par le moteur : cette correction est positive si la charge diminue; mais elle peut être négative pour éviter la pollution au ralenti ou en cas d'emploi du frein-moteur. Cette correction est basée sur la dépression.

Exemples d'ordres de grandeur des avances :

Le calage initial de l'allumeur donne une avance de  $10^\circ$  d'angle vilebrequin; l'avance maximale donnée par l'allumeur est de  $40$  à  $50^\circ$ , l'angle ajouté à celui de l'avance initiale étant donné par les corrections centrifuges ( $20$  à  $40^\circ$ ) et de dépression (de l'ordre de  $20^\circ$ ).

### 3.1. L'avance initiale

Compte tenu du délai de combustion des gaz, on provoque l'allumage avant le PMH fin de compression, afin d'avoir une pression maximale sur le piston lorsque la bielle et la manivelle forment un angle de  $90^\circ$ .

Ce réglage s'appelle le point d'avance initiale. On l'effectuera moteur à l'arrêt.

### 3.2. Les corrections d'avances

Pour donner un rendement de cycle optimal le point d'avance varier selon deux critères :

- Le régime moteur : l'avance doit augmenter avec la vitesse de rotation afin de garder une durée de combustion correcte.
- la charge du moteur : suivant le remplissage la durée de combustion varie.
  - bon remplissage  $\rightarrow$  combustion rapide  $\rightarrow$  réduire l'avance
  - mauvais remplissage  $\rightarrow$  combustion lente  $\rightarrow$  augmenter l'avance.

#### 3.2.1. Les dispositifs centrifuges d'avance

Quand la vitesse de rotation augmente, les masselottes s'écartent et décalent l'arbre porte-came en avant de l'arbre de commande : l'avance augmente.

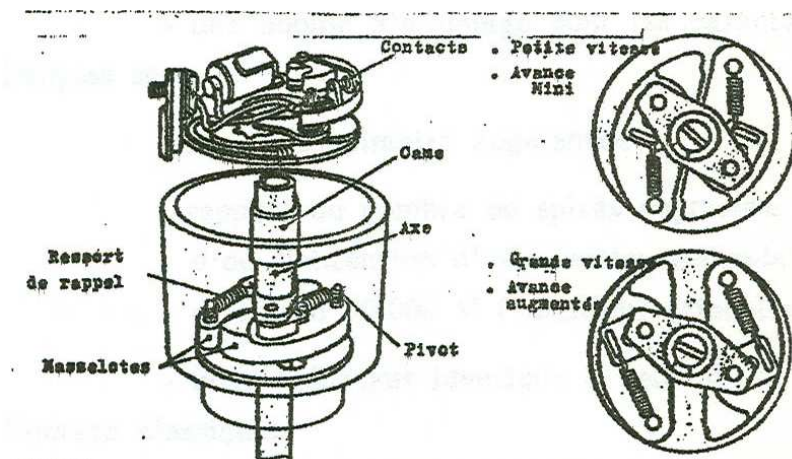


Fig.10.10. Correcteur centrifuge

#### 3.2.2. Les dispositifs à dépression

Le remplissage étant caractérisé par la dépression dans le carburateur on utilise cette dépression pour modifier l'avance.

Pour cela on utilise une capsule manométrique dont la membrane se déplace en fonction de la dépression et modifie le point d'avance.

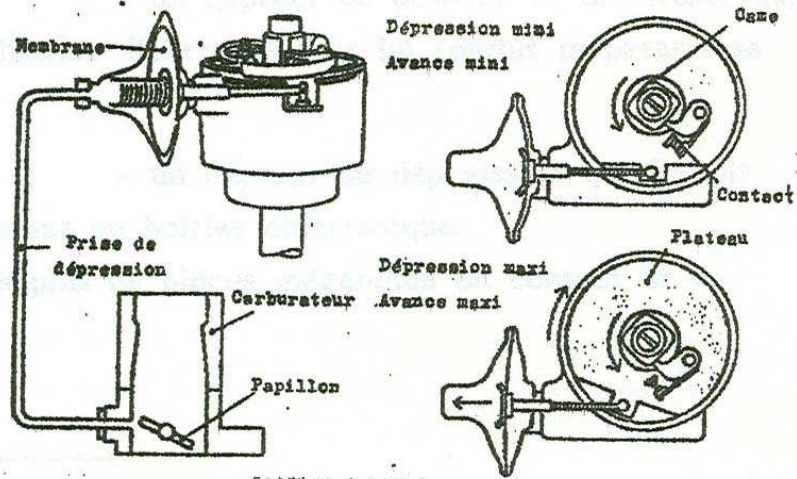


Fig.10.11. Correcteur à dépression

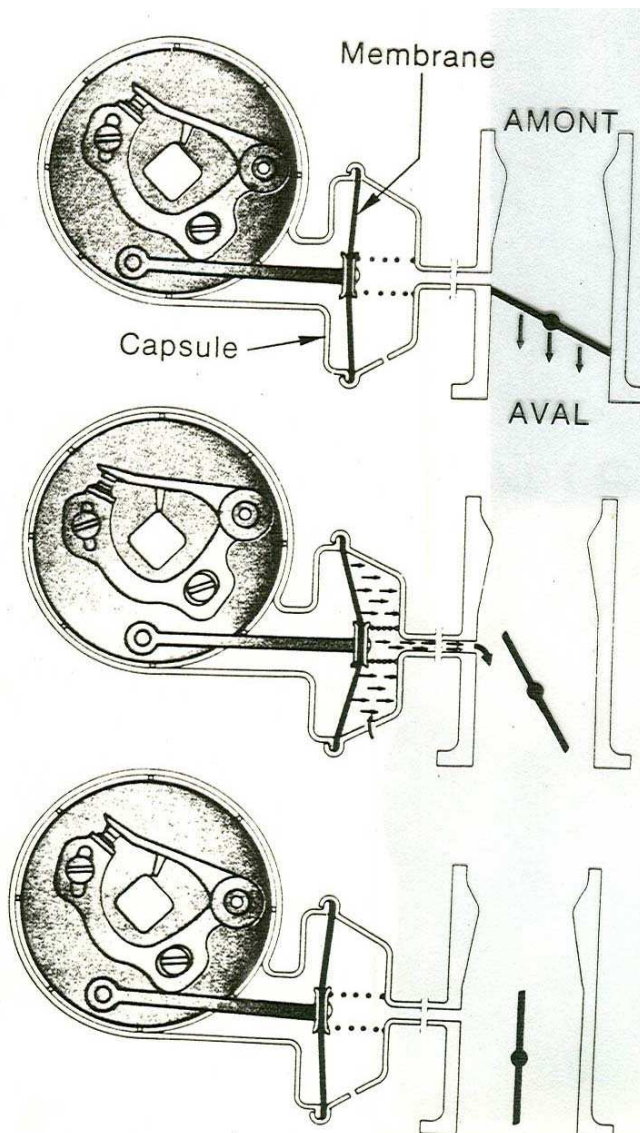


Fig.10.12. Dispositifs d'avance à dépression

- Au ralenti :  
La dépression n'a pas d'action sur la membrane, le pointeau port-rupteur n'est pas déplacé : pas de correction d'avance.  
Cas de retard à dépression : quand on fait intervenir une deuxième capsule manométrique agissant en sens inverse de la capsule à l'avance.
- Lors d'une faible ouverture du papillon (mauvaise préparation du mélange, durée de combustion assez longue).  
La dépression sur la membrane est importante : le plateau est décalé, la correction d'avance est importante.
- A pleine charge  
La membrane n'est plus soumise à la dépression, il n'y a pas de correction d'avance.

#### 4. Allumage électronique

L'allumage classique présente quelques inconvénients essentiellement liés à la rupture mécanique du circuit primaire :

- intensité primaire limitée pour éviter la détérioration des contacts.
- problème de rebondissement du linguet mobile à haute vitesse.
- dérèglement du point d'avance lors de l'usure des contacts.

La solution à ces inconvénients est de remplacer le rupteur mécanique par un rupteur électronique commandé par un très faible courant permettant un courant primaire plus important.

##### 4.1. Principe de l'allumage électronique

Le système comprend :

- Une bobine d'allumage dont les caractéristiques sont :
  - intensité primaire augmentée.
  - rapport du nombre de spires augmenté d'où l'obtention d'une tension secondaire d'environ 50 000 V (meilleure étincelle).
- Un distributeur identique à celui d'un allumage classique.
- Un boîtier électronique qui amplifie le courant émis par l'impulseur et calcule, en fonction des paramètres de vitesse et de charge, le point d'allumage.
- Un capteur de position et de vitesse qui provoque la commande du boîtier électronique et lui fournit le paramètre vitesse de rotation.
- Un capteur de dépression qui fournit le paramètre charge du moteur au boîtier électronique.

Un tel système ne présente plus de pièces mécaniques en contact et ne nécessite aucun réglage.

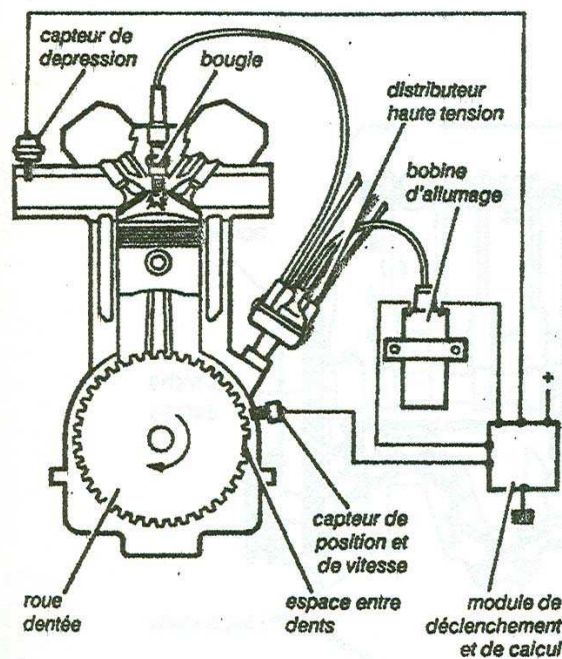
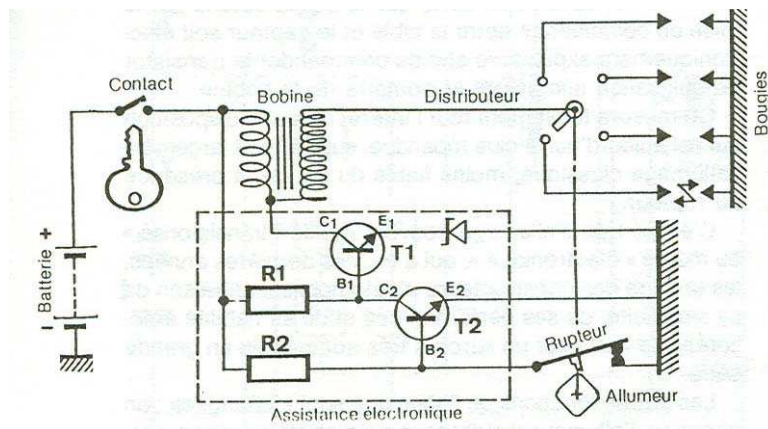


Fig.10.13. Système d'allumage électronique

#### 4.2. L'allumage à rupteur transistorisé



Le schéma de principe de la figure ci-contre illustre le fonctionnement d'un allumage à rupteur transistorisé dans lequel l'allumeur-distributeur reste classique.

Fig.10.14. Schéma de principe transistorisé

Le rupteur étant fermé, la base du transistor T2 a un potentiel négatif (elle est court-circuitée), ce qui a pour effet de bloquer T2.

##### Première phase :

À la fermeture du contact, la base de T1 est portée à un potentiel positif, à travers la résistance de polarisation R1. L'établissement du courant base-émetteur débloque le transistor T1 qui devient passant. Le courant collecteur-émetteur (C<sub>1</sub>-E<sub>1</sub>) circule et permet l'établissement du courant primaire dans la bobine.

##### Deuxième phase :

L'ouverture des grains du rupteur jouant le rôle de déclencheur, la base de T2 qui était négative, devient instantanément positive à travers la résistance de polarisation R2.

Un courant base-émetteur (B<sub>2</sub>-E<sub>2</sub>) s'établit, ce qui a pour effet de débloquent T2. Il devient conducteur. La base de T1 est court-circuitée, c'est-à-dire portée à un potentiel négatif. T1 court-circuité est bloqué et interrompt la circulation du courant dans le primaire de la bobine.

Puis les grains se ferment de nouveau, T2 est bloqué. T1 devient passant, le courant circule dans le primaire de la bobine, et le cycle recommence.

#### 4.3. L'allumage électronique intégral

L'allumage électronique intégral ne comporte aucune pièce en mouvement. Un certain nombre de capteurs émettent des signaux électriques reçus par un calculateur électronique.

Après traitement des informations celui-ci transmet au bobinage primaire des variations de courant permettant l'obtention d'une force électromagnétique (f.é.m.) induite élevée au moment le mieux adapté aux conditions instantanées de fonctionnement.

Un ou plusieurs capteurs sont fixés dans des positions angulaires précises sur un carter, à proximité immédiate du volant moteur.

Un ou plusieurs plots métalliques sont fixés sur les périphéries du volant. Lorsqu'un plot passe sous un capteur, ce dernier émet un signal électrique transmis au calculateur.

La position des capteurs et la valeur des signaux émis permettent de détecter :

- La vitesse de rotation du moteur,
- Le point d'avance initiale,
- Le point d'avance maximale.

D'autres sondes ou capteurs permettent d'enregistrer notamment :

- La pression d'admission,
- La température,
- Les détonations.

Le calculateur, après analyse des données, détermine avec précision le point d'allumage.

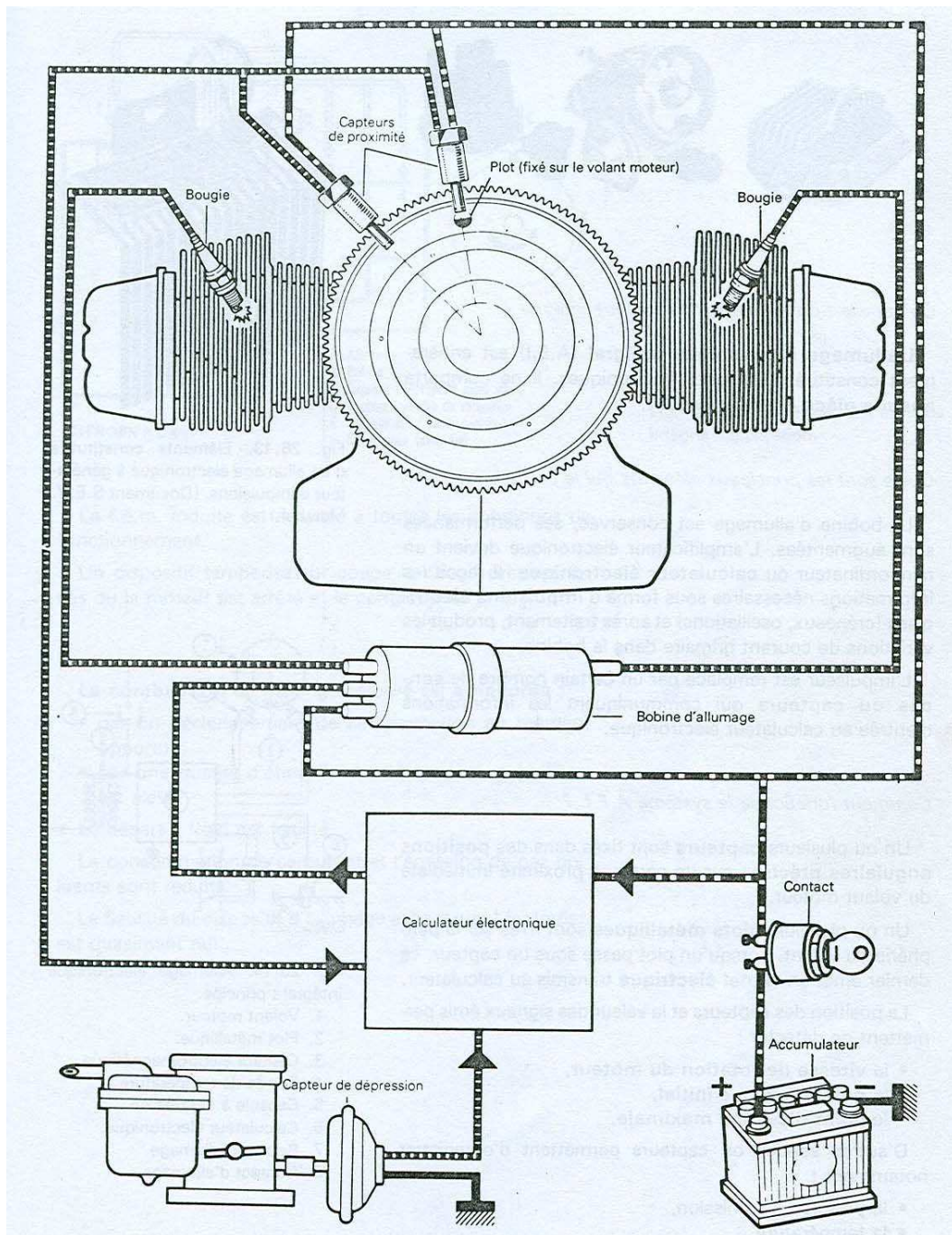


Fig. 10.15. Allumage électronique intégral

## PARTICULARITES DU MOTEUR DIESEL

### 1. Généralités

#### 1.1. Comparaison moteur diesel et moteur à essence

La différence essentielle entre un moteur du type diesel et un moteur à essence réside dans le mode d'inflammation du carburant et de la caractéristique d'auto-inflammation de celui-ci.

Si dans une masse d'air suffisamment comprimée pour que sa température atteigne une valeur déterminée, on introduit un combustible finement pulvérisé, la combustion se déclenche par auto-inflammation.

Le phénomène d'auto-inflammation résulte lui-même :

- d'une part, d'un rapport volumétrique très élevé : 16/1 à 24/1;
- d'autre part, de la haute température engendrée par ce rapport  $\cong 600^{\circ}\text{C}$ .

*Tableau comparatif*

<i>Temps du cycle</i>	<i>Fonctions assurées dans le moteur diesel</i>	<i>Organes en fonctionnement</i>	<i>Fonctions assurées dans le moteur à essence</i>	<i>Organes en fonctionnement</i>
1. Admission	Aspiration d'air	Soupapes d'admission	Aspiration d'un mélange air-essence préparé et dosé par un carburateur ou un système d'injection essence	Soupapes d'admission Carburateur ou injecteurs
2. Compression	Très forte 20 à 30 bars compression de l'air d'où échauffement à 600°C environ. Rapport volumétrique de 16/1 à 24/1		Compression du mélange 8 à 12 bars d'où échauffement à 300°C environ. Rapport volumétrique 5/1 à 11/1	
En fin de course de compression	Injection sous forte pression (100 à 300 bars) du combustible qui s'enflamme spontanément au contact de l'air surchauffé	Pompe d'injection Injecteur	Allumage du mélange par étincelle électrique à la bougie	Allumeur ou magnéto et bougies d'allumage
3. Combustion ou explosion	Combustion et détente		Combustion et détente	
4. Echappement	Evacuation des gaz brûlés	Soupapes d'échappement	Evacuation des gaz brûlés	Soupapes d'échappement

## 1.2. Cycle diesel mixte

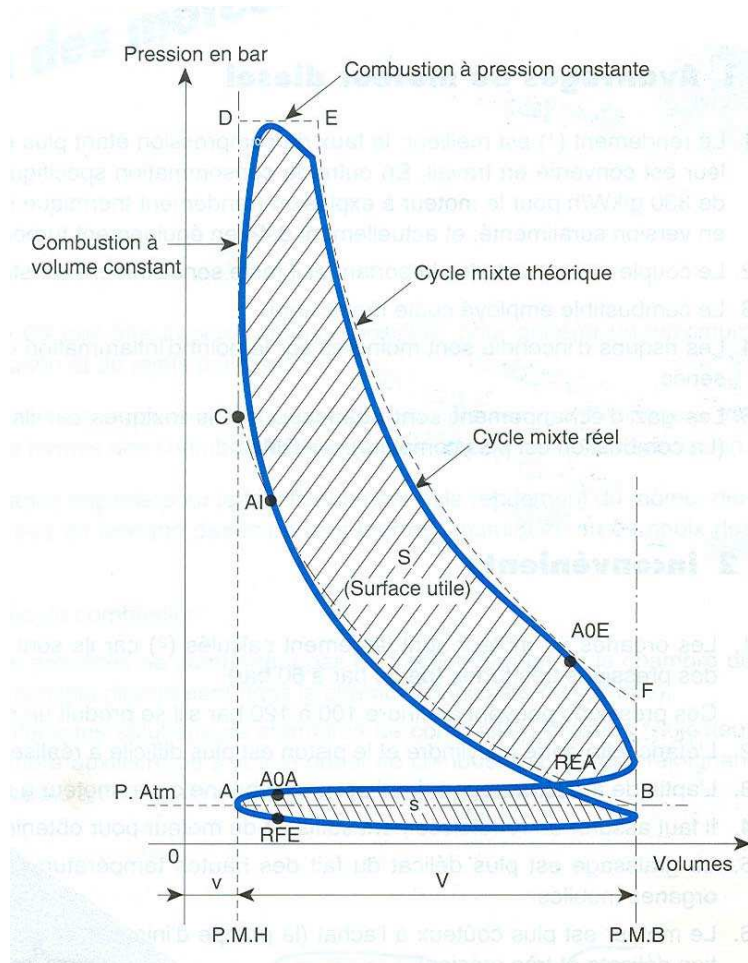


Fig.11.1. Cycle diesel mixte

Ce cycle est employé principalement sur les diesel modernes à grande vitesse de rotation (1500 à 5400 tr/min).

C'est une combinaison des deux cycles classiques dans lesquels une partie du combustible brûle à volume constant et l'autre partie à pression constante.

Le cycle mixte se rapproche plus ou moins de l'un des deux cycles classiques selon les réglages qui déterminent l'injection. Le cycle à volume constant donne un rendement meilleur et le cycle à pression constante permet la construction de moteurs plus légers puisque la pression maximale est plus faible.

### 1.2.1. Avantages du moteur diesel

- Meilleur rendement : grâce à l'augmentation du rapport volumétrique la combustion est plus complète et la consommation spécifique est réduite (en moyenne de 200 g/kW/h contre 330 g/kW/h pour le moteur à essence).
- Le couple moteur est plus important et il reste sensiblement constant pour les faibles vitesses.
- Le combustible employé coûte moins cher.
- Les risques d'incendie sont moindres car le point d'inflammation du gazole est plus élevé que celui de l'essence.
- Les gaz d'échappement sont moins toxiques car ils contiennent moins d'oxyde de carbone.

### 1.2.2. Inconvénients

- Les organes mécaniques doivent être surdimensionnés.
- Le bruit de fonctionnement est élevé.
- La température dans les chambres de combustion est élevée ce qui implique un refroidissement plus efficace.
- L'aptitude au démarrage à froid est moins bonne qu'un moteur à allumage commandé.

## 2. Classification des moteurs diesel

Les moteurs diesel sont classés selon le type d'injection et de chambre de combustion qui les équipent.

Deux grandes familles de types de combustion existent :

- L'injection directe, qui désigne tous les procédés ne comportant pas de fractionnement de la chambre de combustion (l'injecteur pulvérise le combustible directement dans la chambre principale du cylindre).
- L'injection indirecte, regroupant les différentes solutions de chambres de combustion divisées (l'injecteur pulvérise le combustible dans une chambre auxiliaire où a lieu le début de combustion), les gaz rejoignant ensuite la chambre de combustion principale à travers un passage ou des canaux de liaison.

### 2.1. Moteur à injection directe

Deux techniques de combustion sont employées :

- Par énergie des jets d'injecteur : utilisé dans les gros moteurs lents, l'injecteur central comporte de 6 à 8 trous, pulvérise le combustible (tarage de 200 à 350 bars) à la circonférence de la chambre de combustion de grand diamètre et peu profonde du piston. Le système fonctionne sans tourbillon d'air (swirl), mais exige une grande précision du positionnement de l'injecteur (à proximité de la chambre) et un excès d'air très important.
- Par mouvement tourbillonnant de l'air (swirl) : c'est le procédé le plus utilisé sur tous les moteurs modernes, le mouvement tourbillonnant de l'air est amorcé par la forme du conduit d'admission la chambre de combustion dans le piston est plus réduite, et comporte une forme variable selon le constructeur, en perpétuelle évolution en fonction de la normalisation antipollution, afin d'améliorer sans cesse l'homogénéité du mélange air-combustible.  
L'injecteur utilisé est du type à trous multiples (3 à 6).

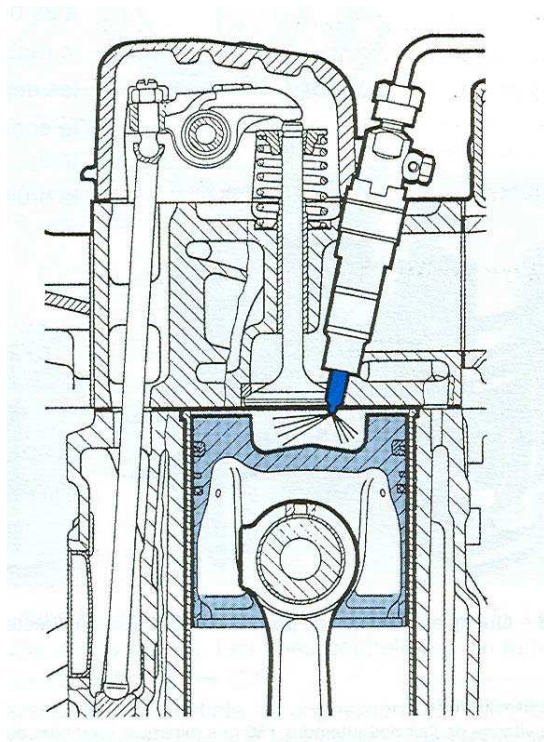


Fig.11.2. Injection directe

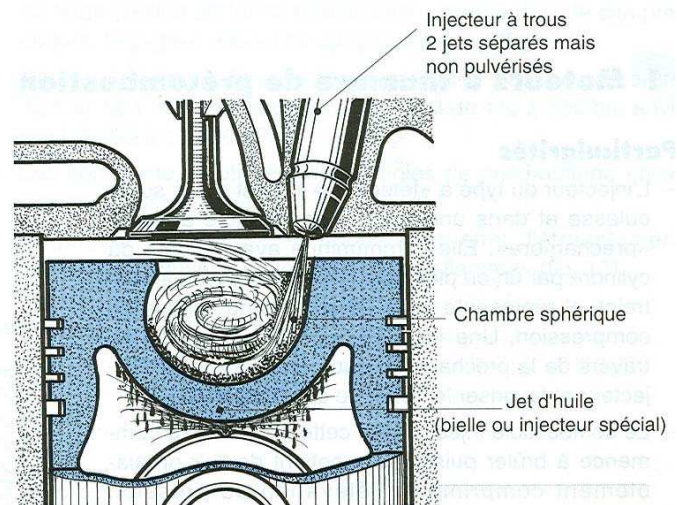


Fig.11.3. La chambre de tourbillon d'air

Le principe de fonctionnement est le suivant :

Pendant l'admission, l'air pénètre dans le cylindre par la volute d'admission. Elle lui imprime un mouvement tourbillonnant très intense, créant un cyclone qui se poursuit pendant la compression.

En fin de compression, l'injecteur introduit le combustible dans la chambre sphérique du piston. Le jet très court est dirigé sur la paroi, et s'étale sur elle en un film mince. Les fines gouttelettes qui forment un brouillard autour de ce jet s'oxydent et amorcent la combustion.

Ce début de combustion s'effectuant avec une faible quantité de combustible, le cognement est éliminé. Le reste du combustible étalé en film mince s'évapore lentement, permettant aux vapeurs de se mélanger à l'air à l'air tourbillonnant.

## 2.2. Moteurs à injection indirecte

### 2.2.1. Moteurs à chambre de précombustion

L'injecteur du type à téton est placé sur la culasse et dans une cavité non refroidie appelée "préchambre". Elle communique avec le haut du cylindre par un ou plusieurs orifices de passage restreint, et représente entre 20 et 30% du volume de compression.

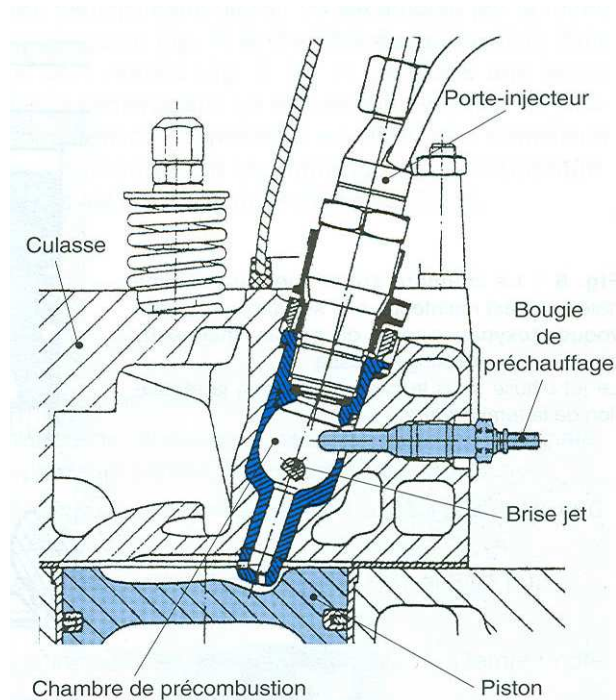


Fig. 11.4. Moteur à chambre de précombustion

La combustible injecté dans cette préchambre commence à brûler puisqu'elle contient de l'air préalablement comprimé et élévation de pression résultant de cette précombustion expulse le mélange vers le cylindre où la combustion se poursuit. Cette combustion étagée assure un fonctionnement moins bruyant car les pressions d'injection sont modérées (100 à 150 bars) et le rapport volumétrique varie de 12/1 à 15/1.

Le démarrage s'opère généralement à l'aide d'une bougie de préchauffage car le taux de compression adopté ne permet pas de porter l'air ambiant à une température suffisante lorsque la culasse est froide.

### 2.2.2. Moteurs à chambre de turbulente

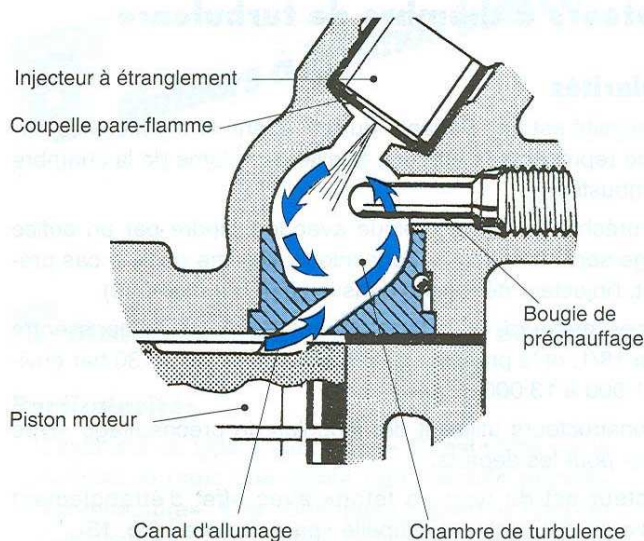


Fig.11.5. Chambre de turbulence "Ricardo"

Ce dispositif est une variante du précédent : la chambre de turbulence représente la presque totalité du volume de la chambre de combustion. Cette préchambre communique avec le cylindre par un orifice de large section de forme tronconique; comme dans le cas précédent, l'injecteur débouche dans la chambre.

Pour ces moteurs, le rapport volumétrique est compris entre 15/1 et 18/1, et la pression d'injection est de 110 à 130 bars.

### 2.2.3. Moteurs à chambre d'air

La réserve d'air communique avec le cylindre par un orifice important mais l'injecteur est placé en dehors de cette chambre et il est disposé de façon telle que le jet de combustible vient à la rencontre de l'air comprimé qui sort de la chambre.

Il en résulte une grande souplesse de fonctionnement car un brassage énergétique de l'air et du combustible favorise la combustion.

Ces systèmes ont été abandonnés depuis plusieurs années.

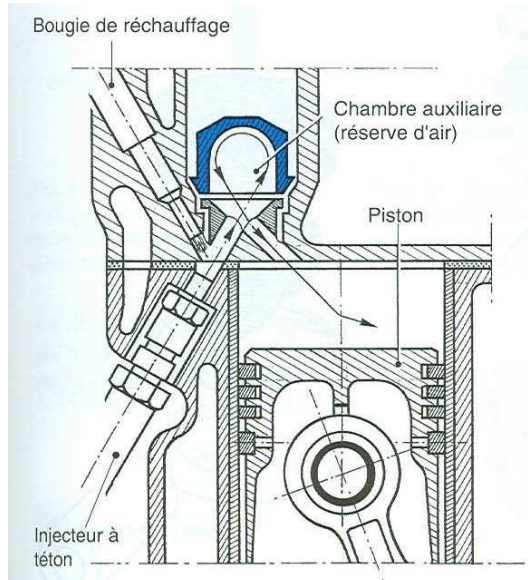


Fig.11.6. Chambre Saurer

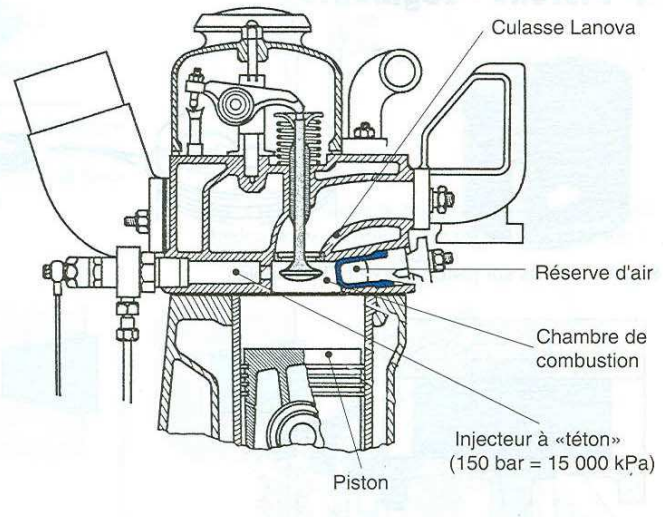


Fig.11.7. Système "Lanova"

## COMBUSTION ET SURALIMENTATION

### 1. Introduction

Dans un moteur diesel, le processus complexe du déroulement de la combustion est lié aux caractéristiques principales suivantes :

- combustible utilisé,
- pression d'injection, qualité de la pulvérisation (modèle d'injecteur),
- point d'injection et taux d'introduction,
- pression de compression dans le cylindre moteur (lié au rapport volumétrique),
- température de l'air et quantité d'oxygène au moment de l'injection,
- type de chambre de combustion (injection directe, préchambre, chambre de turbulence, ...) et homogénéité du mélange,
- vitesse de rotation et température du moteur.

### 2. Combustibles utilisés

#### 2.1. Généralités

Les combustibles qu'il est possible d'injecter dans les cylindres des moteurs diesel sont en général :

- le gazole et le fioul (fuel) léger (applications routières ou agricoles),
- les fiouls lourds, les huiles de goudron (qui proviennent des goudrons de lignite et de charbon bitumeux) uniquement utilisées pour les gros moteurs fixes, marine ou industrie,
- biocarburants (à base d'huiles végétales diverses, colza, palme, ...).

#### 2.2. Caractéristiques de gazole

Le gazole est un des produits de la distillation ou du cracking des pétroles bruts. Son emploi est obligatoire dans les moteurs diesel routiers. Il représente un mélange complexe de nombreux hydrocarbures.

Les indications qui suivent précisent les caractéristiques usuelles du gazole. En outre, elles soulignent leur importance en ce qui concerne l'utilisation de ce carburant dans les moteurs diesel.

- Masse volumique : Elle est variable suivant l'origine du pétrole brut et le mode de traitement subi (en moyenne, de  $0.850 \text{ Kg/dm}^3$  à  $15^\circ\text{C}$ ) et elle diminue de  $0.0007$  pour chaque degré d'élévation de température.
- Pouvoir calorifique : Il est légèrement inférieur à celui de l'essence; sa valeur moyenne est de  $10\,800 \text{ Cal/Kg}$ .

- Volatilité : Pratiquement, la distillation du gazole commence vers 200°C et se termine aux environs de 370°C.  
Les spécifications légales indiquent :
  - limite inférieure à 250°C (point d'ébullition initiale),
  - limite supérieure 350°C (point de fin distillation).
- Viscosité : environ 9.5 mm<sup>2</sup>/s à 20°C.
- Indice ou nombre de cétane (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>) : (Aptitude à l'inflammation)  
On appelle "indice de cétane" du combustible à étudier, le pourcentage de cétane contenu dans un mélange qui produit le même délai d'allumage que le combustible essayé.  
Les combustibles commerciaux pour moteurs diesel ont un nombre de cétane compris entre 45 et 55 (pour le gazole moteur, l'indice doit être au moins égal à 48).

### 3. Processus de combustion

Dans un moteur diesel, le mélange air-combustible n'est jamais homogène car le combustible n'est injecté que vers la fin du temps de compression.

Le combustible ne peut pas s'enflammer dès que commence son introduction dans le cylindre puisqu'il doit, au préalable, emprunter à l'air comprimé dans la chambre et aux parois la chaleur qui lui est nécessaire pour atteindre sa température d'auto-inflammation.

Théoriquement il faut 20 à 22 g d'air pour brûler 1 g de gazole; en pratique, on utilise 25 à 30 g d'air, en moyenne, pour brûler 1 g de gazole.

Un excès d'air est toujours nécessaire car il permet :

- de mieux brasser l'air et le combustible,
- d'enflammer les gouttelettes non mélangées à l'air au moment de l'injection.

#### 3.1. Compression de l'air

Le volume d'air présent dans le cylindre après le temps "aspiration" (avec un début de mouvement "tourbillonnant" selon la forme du conduit d'admission ou la présence d'un déflecteur sur la soupape d'admission) est comprimé par la montée du piston vers le PMH. Cette compression engendre une montée rapide en température, qui doit atteindre au minimum 500°C pour assurer l'inflammation spontanée du mélange au moment d'injection

#### 3.2. Analyse de la combustion

A partir du début de l'injection, quatre phases successives se déroulent :

- **Le délai d'inflammation** (Points A→B, fig12.1.)

C'est la phase (très courte) préparatoire à la combustion, qui sépare le début de l'injection du début de l'inflammation du combustible. Ce délai, lié à la nature

du combustible (indice de cétane) et à certains phénomènes physiques et chimiques se décompose en :

- *Délai physique* : c'est le temps pendant lequel les fines gouttelettes de gazole s'échauffent au contact de l'air jusqu'à leur "vaporisation" (variable selon la température de l'air, la vitesse, la dimension des gouttelettes et la viscosité de combustible, ...).
- *Délai chimique* : Pendant le temps qui précède l'inflammation, se réalise "oxydation" du combustible. La durée est comprise entre 0.001 et 0.002 seconde, une montée constante de la pression de compression a lieu pendant cette phase, proportionnelle à l'angle de rotation du vilebrequin (10 à 20°).

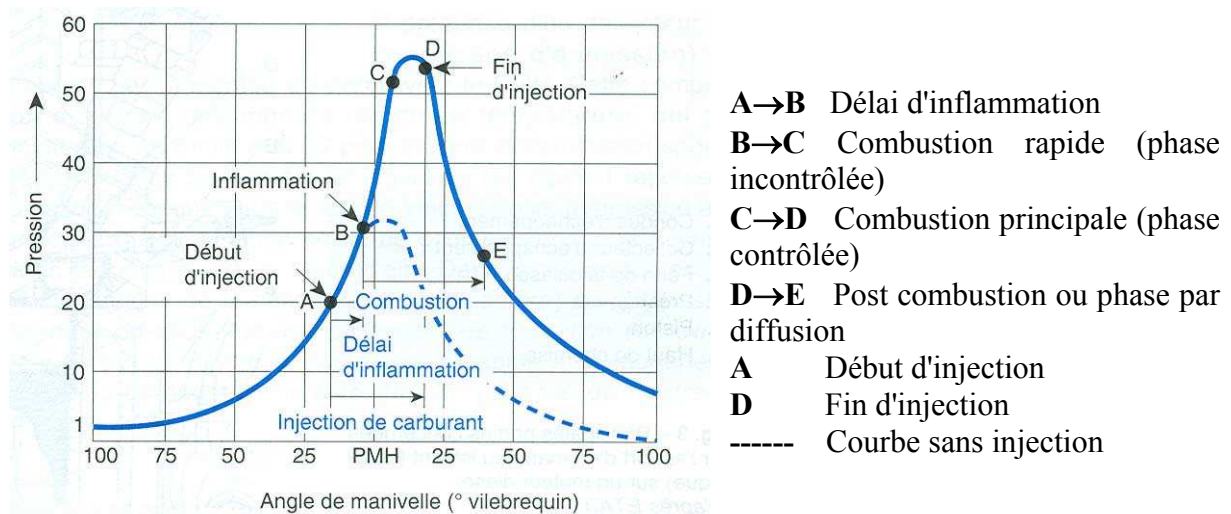


Fig. 12.1. Chronologie de la combustion

- **Propagation de la flamme** (points **B** → **C**, fig.12.1.)  
Le mélange carburant est formé, et le processus d'inflammation s'amorce en une multitude de points, à une vitesse extrêmement grande (présence d'un excès important d'oxygène et d'une masse de combustible pulvérisé durant le délai d'inflammation).  
La vitesse de combustion (1000 à 1200 m/s) définit la montée en pression dans le cylindre et le bruit résultant de cette phase (combustion rapide ou phase incontrôlée).
- **Combustion principale** (points **C** → **D**, fig.12.1.)  
L'injection se poursuit, le combustible continue à brûler progressivement, la vitesse de combustion diminue, tandis que la pression et la température continuent à s'élever. C'est la phase de combustion "contrôlée" (en fonction du volume de combustible injecté par degré de rotation du vilebrequin).  
C'est lors de cette phase, qu'une scission des molécules du combustible (cracking) s'effectue et donne naissance à :
  - des produits gazeux et légers qui brûlent,
  - des produits plus lourds (goudronneux) plus difficiles à brûler.
- **Post combustion ou combustion diffusante** (points **D** → **E**, fig.12.1.)  
La fin d'injection (fermeture de l'injecteur) se produit au point "**D**", mais le mélange carburant restant continue à brûler.

Les conditions sont de plus en plus défavorables :

- raréfaction de l'oxygène,
- volume croissant de la chambre de combustion (pression et température en baisse rapide, descente du piston vers le PMB),
- hydrocarbures restants difficiles à brûler.

La durée de cette dernière phase est liée aux deux précédentes (une qualité de pulvérisation médiocre ou une mauvaise combustion principale vont augmenter la post combustion). La phase de post combustion doit être la plus courte possible, toute durée supplémentaire se traduit par une augmentation de la température des gaz d'échappement et une baisse de rendement.

#### **4. La suralimentation**

Une augmentation de la puissance du moteur à une même vitesse de rotation est possible en favorisant le taux de remplissage en air des cylindres, par divers procédés.

- Amélioration du remplissage au temps "aspiration" :
  - multiplication du nombre des soupapes (3 ou 4 par cylindre, dont 2 d'admission),
  - montage d'une distribution "variable",
  - études et modifications des conduits d'admission d'air afin d'obtenir une alimentation par "oscillations" ou par "résonance";
- Précompression de l'air ou "suralimentation" : elle consiste à introduire de l'air dans les cylindres à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Ce principe connaît actuellement un engouement extraordinaire.

##### 4.1. Compresseurs de suralimentation

Trois types sont particulièrement utilisés et tendent vers un même but malgré des conceptions différentes :

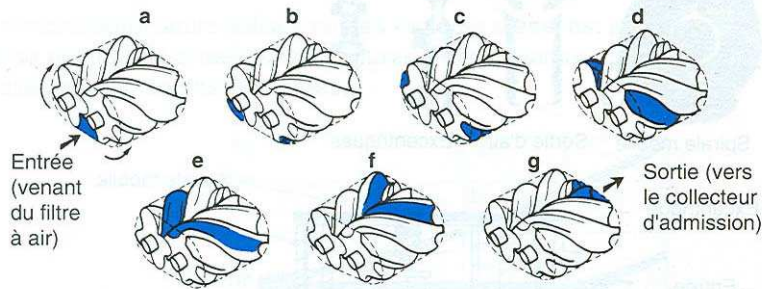
- Appareils du type volumétrique entraînés mécaniquement,
- Appareils du type centrifuge qui comportent une turbine entraînée par les gaz d'échappement et accouplée directement à un compresseur (turbocompresseur),
- Appareils à "ondes de pression" (différence de pression entre l'admission et l'échappement appelé également "échangeur de pression").

##### 4.1.1. Compresseurs volumétriques

Ces appareils entraînés par le moteur, permettent l'obtention d'une pression dès le début de l'accélération du moteur (couple important à bas régime), mais la puissance absorbée à régime élevé est importante, par rapport à un débit d'air limité.

### □ *Compresseurs à vis*

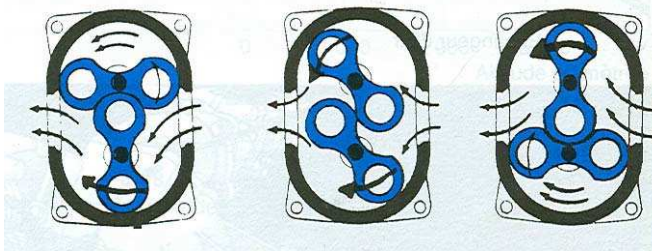
Deux rotors à vis, entraînés par le moteur, tournent en sens inverse, à l'intérieur d'un boîtier où ils obligent l'air à circuler en se comprimant côté sorti.



**a, b, c, d** Entrée d'air – Remplissage  
**e, f, g** Phases refoulement

Fig.12.2. *Compresseurs à vis*

### □ *Compresseurs à lobes*



Fonctionnement analogue à celui du système ci-dessus, à l'aide de deux lobes tournant en sens inverse.

Fig.12.3. *Compresseurs à lobes*

### □ *Compresseurs à pistons rotatifs*

Le rotor intérieur, entraîné par courroie, tourne de façon excentrée dans le rotor extérieur.

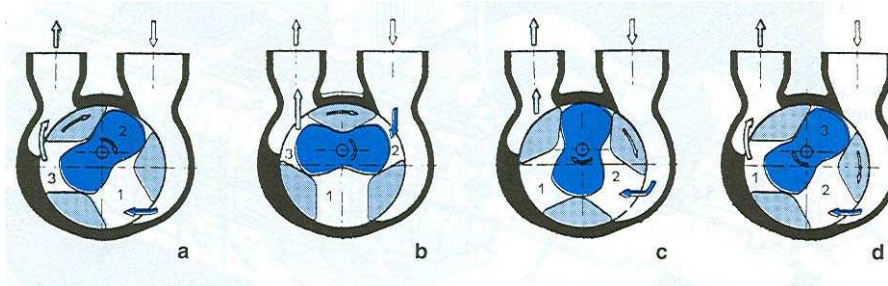


Fig.12.4. *Compresseurs à pistons rotatifs (Système Wankel)*

Position	Chambres		
	1	2	3
<b>a</b>	Aspiration	Début remplissage	Début détente
<b>b</b>	Remplie	Remplissage	Détente
<b>c</b>	Compression	Fin remplissage	Fin détente
<b>d</b>	Début détente	Aspiration	Début remplissage

#### 4.1.2. *Compresseurs centrifuges (turbocompresseurs)*

L'intérêt de cet appareil réside dans son encombrement réduit et, par suite, son poids plus faible.

Cependant, le principal avantage se situe au niveau de l'utilisation de l'énergie cinétique des gaz d'échappement pour son entraînement.

De ce fait, la suralimentation du moteur est réalisée sans aucun prélèvement de puissance.

**Constitution :**

Le turbocompresseur est un appareil centrifuge dont le rotor (équilibré de façon rigoureuse en usine) tourne à grande vitesse (80 000 à 150 000 tr/min), celle-ci étant proportionnelle à l'énergie des gaz de combustion (pour un turbocompresseur non régulé), et qui comprend des parties distinctes :

- **Le carter central** ou support, comprenant les paliers, le rotor complet équilibré, le système de graissage et de refroidissement.
- **L'étage turbine** où les gaz de combustion en provenance des cylindres du moteur sont canalisés vers une roue axiale. Ces gaz se détendent et mettent en rotation la roue de turbine, avant d'être rejetés vers la tuyauterie d'échappement. Cette partie du turbocompresseur est soumise à des températures élevées ( $>$  à  $650^{\circ}\text{C}$ ), ce qui nécessite l'emploi de matériaux spéciaux (fonte GS pour le carter et acier allié au nickel ou maintenant céramique pour la turbine) et d'un refroidissement efficace par circulation d'huile et quelque fois d'eau.
- **L'étage compresseur** : l'air pénètre axialement dans le compresseur, est mis en vitesse par la roue de compresseur, puis dévié de  $90^{\circ}$  vers le diffuseur qui transforme l'énergie cinétique acquise en pression d'air, dirigée vers le collecteur d'admission. Les températures de cet étage étant beaucoup plus faibles que le côté turbine ( $80^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ ), les pièces (roue, carter) sont en alliage d'aluminium.
- **Ensemble tournant** : l'ensemble turbine-arbre est dénommé "rotor". L'ensemble rotor-roue de compresseur constitue "l'ensemble tournant" et demande un équilibrage parfait. Cet ensemble tourne sur film d'huile sans frottement, les coussinets lisses montés flottants dans le carter central servent de guides.

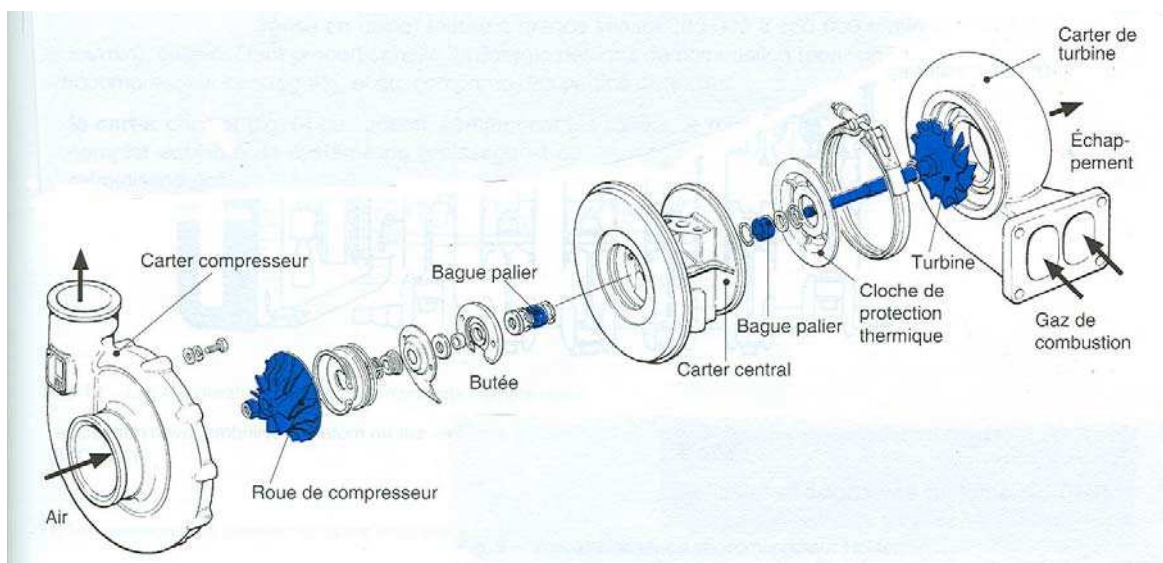


Fig.12.5. Vue éclatée d'un turbocompresseur HOLSET

#### 4.1.3. Suralimentation par ondes de pression (*système Comprex*)

Le procédé "comprex" utilise l'onde de pression générée par un bref contact entre les gaz d'échappement et l'air d'admission (différente de pression) dans les cellules du rotor.

Ce système procure un temps de réponse à bas régime très inférieur à un turbocompresseur classique, tout en gardant des performances comparables à hauts régimes.

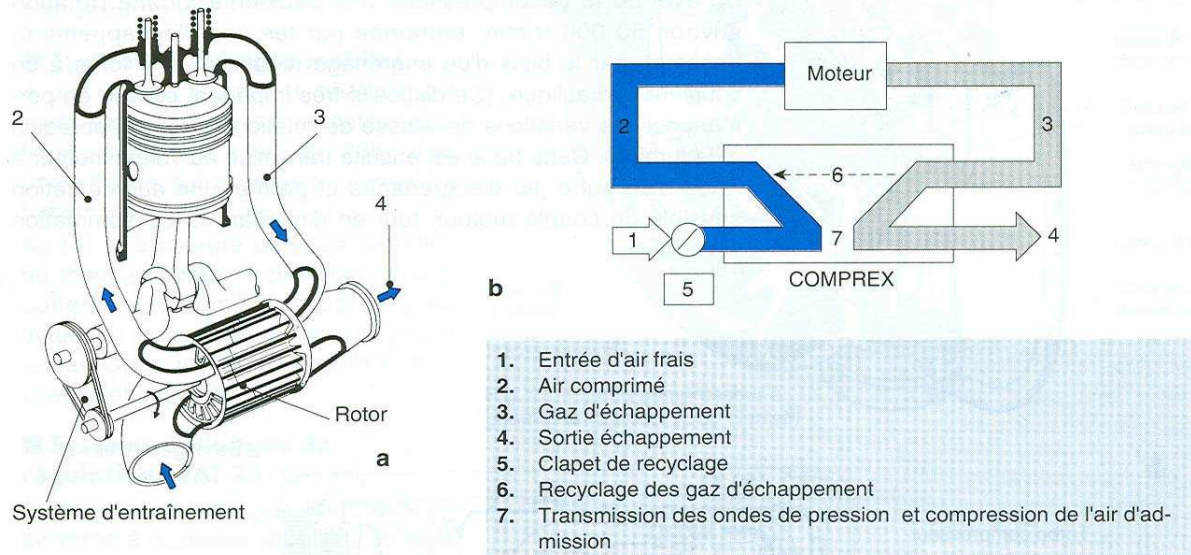


Fig.12.6. Suralimentation par ondes de pression

#### 4.2. Circuit de suralimentation

Les variantes sont nombreuses, allant du circuit simple à un ou deux turbocompresseurs, quelquefois refroidis par eau, avec échangeur de température (air/air ou air/eau), muni ou non d'une régulation de la pression maximum d'admission (haute pression > à 3 bars).

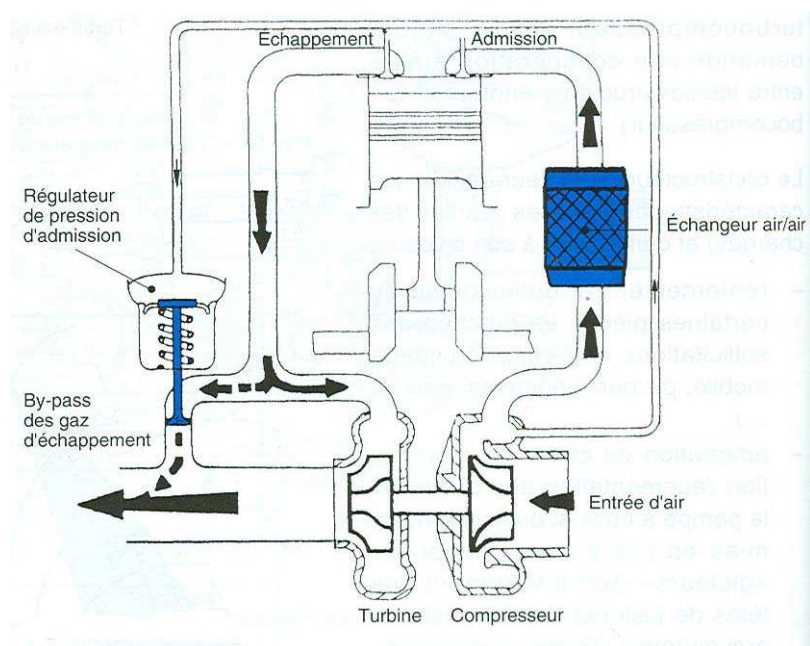


Fig.12.7. Circuit de suralimentation

## ALIMENTATION ET INJECTION

### 1. Circuits d'alimentation

Les circuits d'alimentation permettent d'amener à la pompe d'injection une quantité de combustible suffisante, parfaitement filtrée, sans émulsion ni présence d'eau et sous une pression déterminée.

Ils participent également à la stabilisation de la température de la pompe d'injection et à l'écrêtage des pointes de pression en fin d'injection.

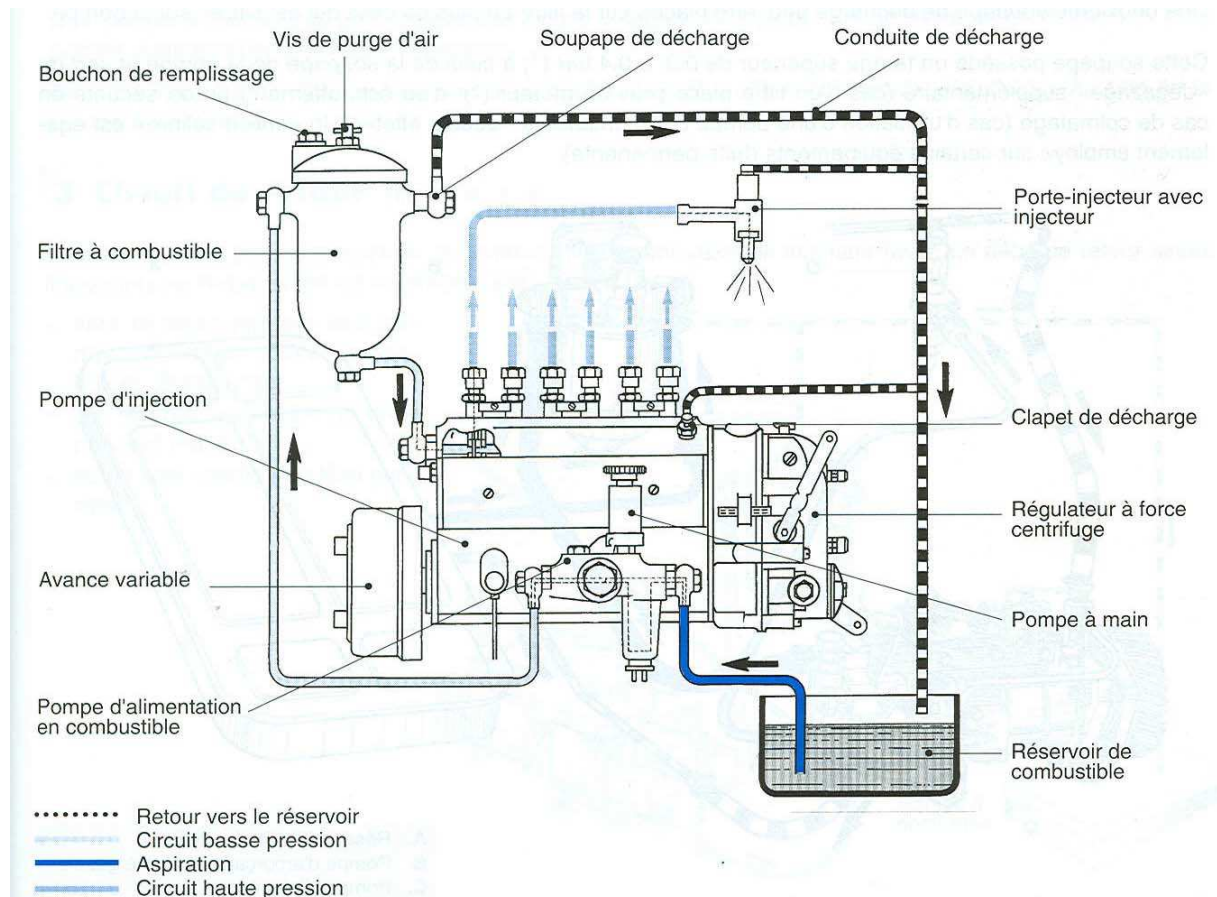


Fig.13.1. Circuit d'alimentation avec pompe en ligne

#### 1.1. Circuit en "aspiration"

Le circuit est compris du plongeur dans le réservoir, en passant par le préfiltre, jusqu'au raccord d'aspiration de la pompe d'alimentation.

C'est uniquement sur cette partie du circuit que l'on peut rencontrer la panne appelée "prise d'air" (raccord mal serré, joint défectueux, canalisation percée, ...).

#### 1.2. Circuit en "basse pression"

Du côté "refoulement" de la pompe d'alimentation, en passant par le filtre principal, jusqu'à la galerie d'alimentation dans la pompe d'injection.

Sur cette partie, tout manque d'étanchéité se traduit par une "fuite".

### 1.3. Circuit à haute pression

De la sortie de la pompe d'injection aux injecteurs, il comprend :

- les tuyauteries HP et leurs raccords,
- les porte-injecteurs,
- les injecteurs.

### 1.4. Les pompes d'alimentation

La pression d'alimentation en combustible d'une pompe en ligne classique varie entre 1 bar et 2.5 bars selon le tarage de la soupape de décharge, pour assurer le remplissage optimal des éléments de pompage, avec un débit égal au moins 1.5 à 2 fois le débit de la pompe d'injection au régime nominal de pleine charge.

Ceci après avoir aspiré le combustible dans le réservoir, en passant par le préfiltre, et refoulé celui-ci à travers le (ou les) éléments filtrants (pompe à piston ou à engrenages).

#### 1.4.1. Pompes à membrane

Elles sont à commande mécanique comme les pompes à essence, avec généralement une cuve de préfiltrage.

Le tarage du ressort de membrane est légèrement supérieur à celui des pompes à essence (0.3 à 0.6 bars).

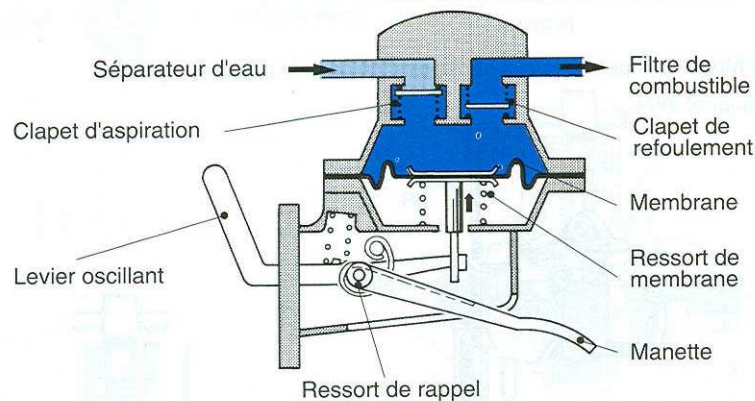


Fig.13.2. Pompe à membrane AC avec préfiltré

#### 1.4.2. Pompes à piston

Ce système est le plus fréquent. Elles sont directement montées sur les pompes d'injection et commandées par l'arbre à came de celle-ci. Elles sont auto-régulatrices grâce à la valeur de tarage du ressort de piston 2.5 à 4 bars.

##### □ *Pompe d'alimentation à simple effet* (Bosch classique)

*Course intermédiaire* (fig.13.3.a)

L'arbre à cames de la pompe d'injection commande le poussoir à galet. Le piston principal (6), sous la poussée de la tige de pression (1), envoie le liquide

contenu dans la chambre **A** vers la chambre **B**, en ouvrant le clapet (7). Un volume correspondant à celui déplacé par la tige de pression (1) est envoyé vers le refoulement.

*Course refoulement-aspiration (fig.13.3.b)*

Le sommet de la came étant dépassé, le ressort principal (3) repousse le piston (6) et la tige de pression (1) :

- le combustible de la chambre **B** est refoulé vers le filtre principal,
- la dépression créée dans la chambre **A** permet l'ouverture du clapet (5) et l'aspiration du combustible venant du réservoir.

*Auto-régulation (fig.13.3.c)*

Si en **B**, la pression de gazole est inférieure à celle qu'exerce le ressort (3), le piston demeure au contact de la tige-poussoir (1) et la course est complète.

Si, au contraire, la pression de gazole en **B** atteint celle exercée par le ressort, le piston se sépare de la tige-poussoir et sa course n'est que partielle. Il s'agit là d'une auto-régulation.

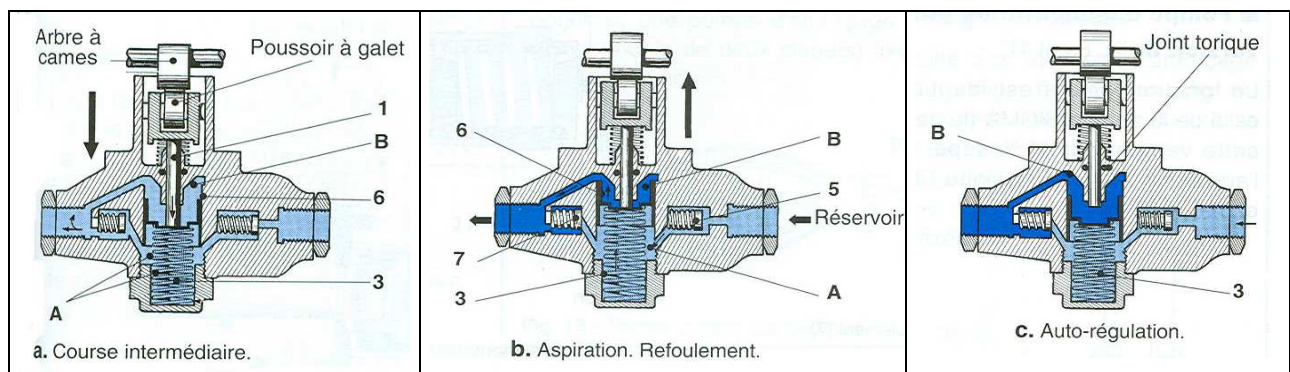


Fig.13.3. Pompe Bosch classique

□ *Pompe d'alimentation Bosch à double effet*

Sous l'action de l'excentrique de commande, le déplacement du piston de pompe vers le bas comprime le ressort provoquant l'ouverture des clapets **A<sub>1</sub>** et **R<sub>1</sub>** ainsi que le refoulement du combustible vers la pompe d'injection.

Lorsque l'excentrique s'efface, le piston se déplace vers le haut sous l'action du ressort provoquant l'ouverture des clapets **A<sub>2</sub>** et **R<sub>2</sub>** et le refoulement vers la pompe d'injection.

Pour chaque déplacement du piston, on obtient une aspiration et un refoulement simultanés du combustible; la pompe d'alimentation est à double effet.

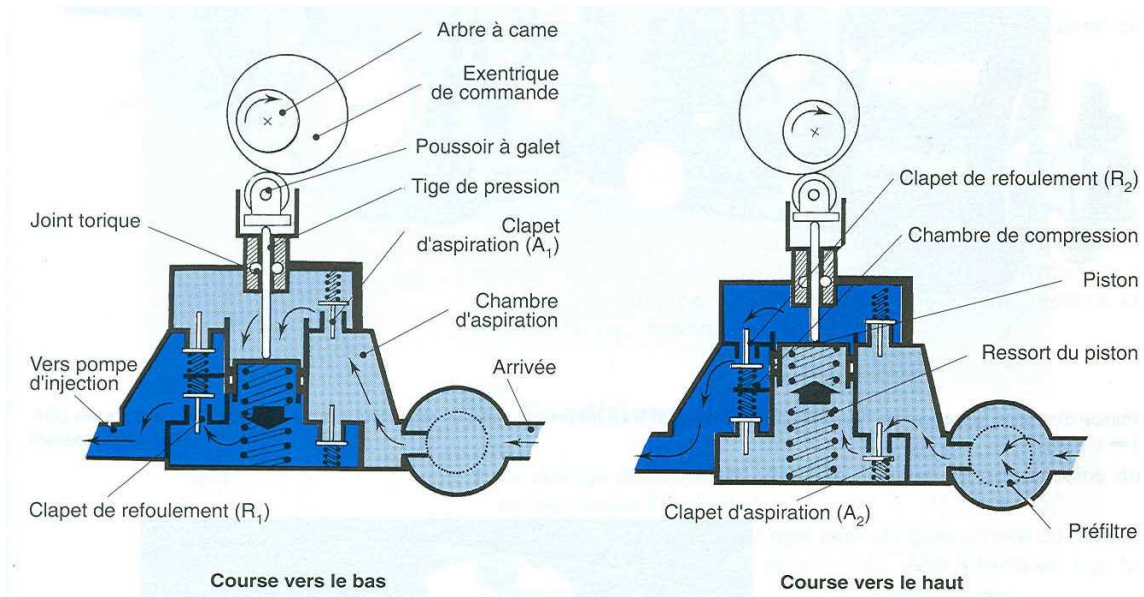


Fig.13.4.Pompe Bosch à double effet

## 2. Systèmes d'injection

### 2.1. Rôle

La pompe d'injection doit refouler sous pression vers chaque injecteur un volume précis de combustible, à l'instant prévu, et pendant une durée déterminée, à travers un circuit hydraulique comprenant soupape de refoulement, raccord et conduite haute pression.

### 2.2. Condition à remplir

- Le dosage doit correspondre très exactement aux besoins du moteur (suivant la charge),
- Il doit être rigoureusement égal pour chaque cylindre du moteur,
- L'injection doit s'effectuer à un instant très précis,
- L'injection doit se produire pendant un laps de temps très court et sans égouttement ultérieur,
- La précision dans l'usinage de la pompe, notamment des pistons et des cylindres, doit être très poussée :
  - la pression instantanée atteinte une valeur très élevée : 1000 bars,
  - la quantité de combustible à refouler par coup de piston est très variable suivant les types de moteurs.

### 2.3. Pompe d'injection Bosch taille "A"

#### 2.3.1. Généralités

Ce type de pompe est commandé par l'arbre à cames et par l'intermédiaire des poussoirs à galets, les pistons ou éléments de pompage possèdent une course de levée constante.

Cette course est en fonction de la taille de la pompe. Par exemple : taille A → 7 mm; taille MW → 10 mm.

Les pistons sont ramenés vers le PMB par des ressorts dont le tarage est fonction de la vitesse maximale de la pompe, qui tourne à la demi-vitesse du moteur.

Le dosage du combustible est assuré par le déplacement en "rotation" des pistons, à l'aide de douilles, reliées à des secteurs dentés réglables en liaison avec la tige de réglage, appelée aussi "crémaillère".

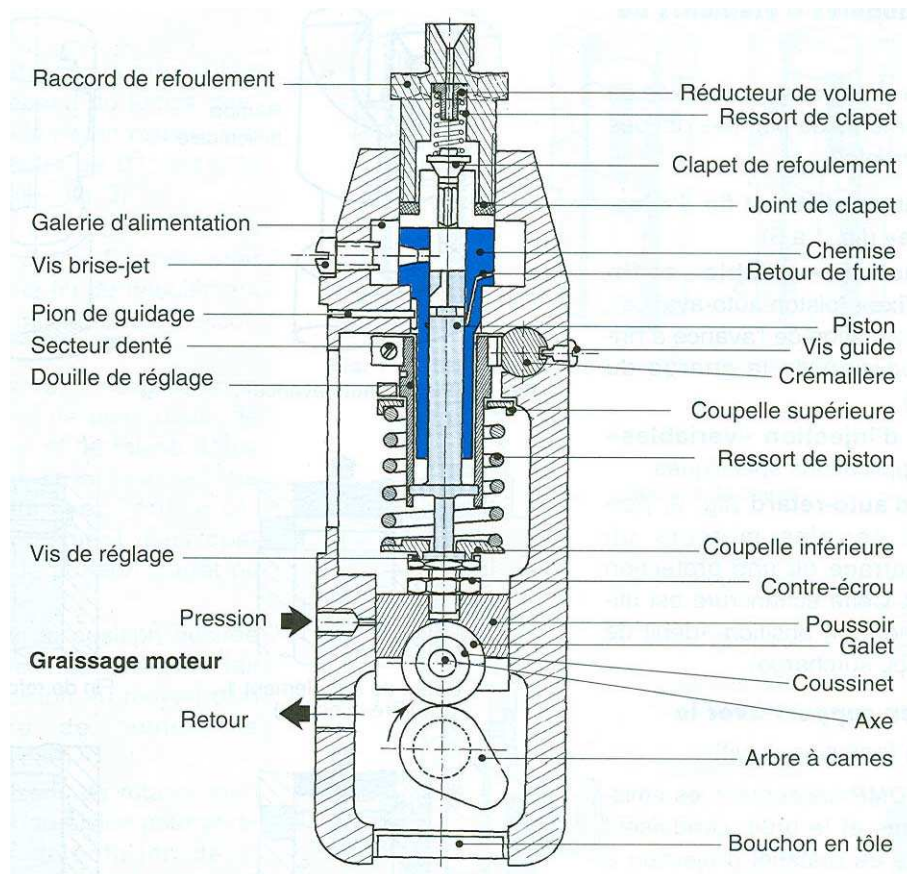


Fig. 13.5. Pompe Bosch taille A avec graissage moteur

### 2.3.2. Éléments de pompage (pistons)

#### ***Fonctionnement***

##### a) *Admission du combustible (remplissage)*

Au PMB, le piston découvre les orifices **0** et **01** d'arrivée du combustible. Celui-ci pénètre dans la chambre **V** et par la rainure verticale, dans la chambre **X**, poussé par la pression d'alimentation.

b) *Précouse*

C'est la course parcourue par le piston entre le PMB et le début de refoulement.

c) *Début de refoulement*

Le piston ayant effectué la précouse, obture les orifices d'arrivée **0** et **01**. C'est le début de refoulement et le combustible comprimé soulève le clapet de refoulement, parcourant ainsi la course de détente.

d) *Course utile*

C'est la course comprise entre l'ouverture de la soupape de refoulement et la fin de refoulement (libération de l'orifice de décharge par la partie inférieure de la rampe du piston).

e) *Fin de refoulement (décharge)*

Dès que l'arête inférieure de la rampe hélicoïdale découvre l'orifice **01**, la pression chute brusquement et le clapet de refoulement retombe sur son siège. Le combustible dans les chambres **V** et **X** est remis à la pression d'alimentation.

Le piston continue ensuite sa course jusqu'au PMH (course de la came).

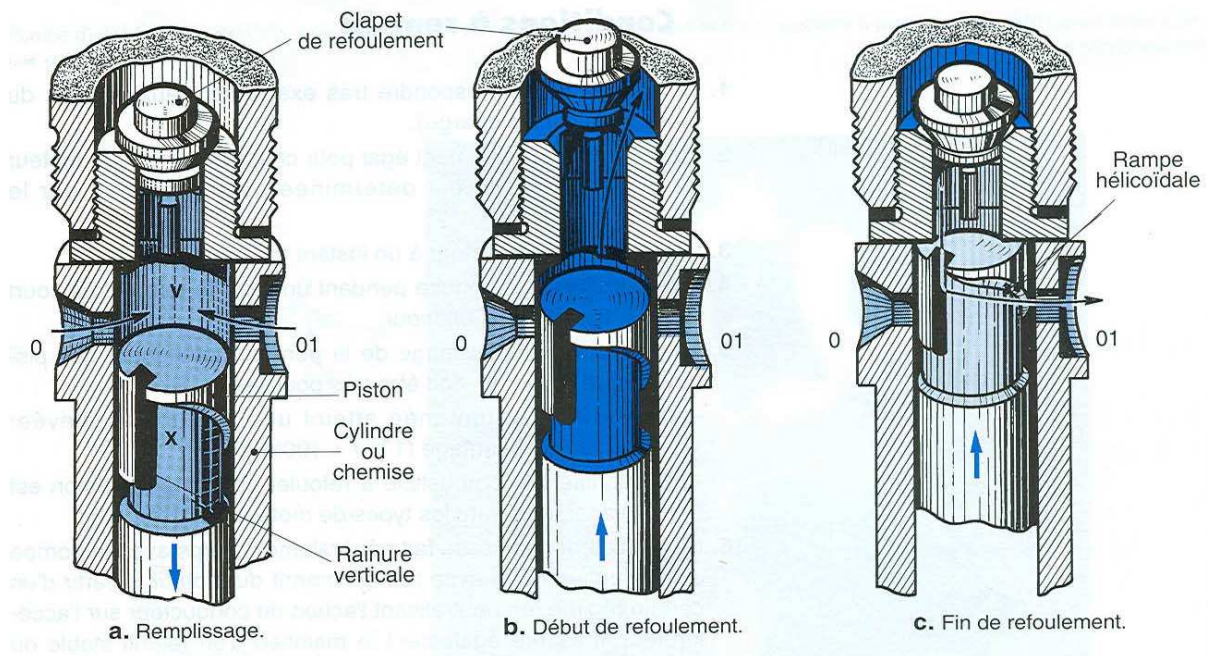


Fig.13.6.Pompe d'injection Bosch taille A

### Différentes positions du piston

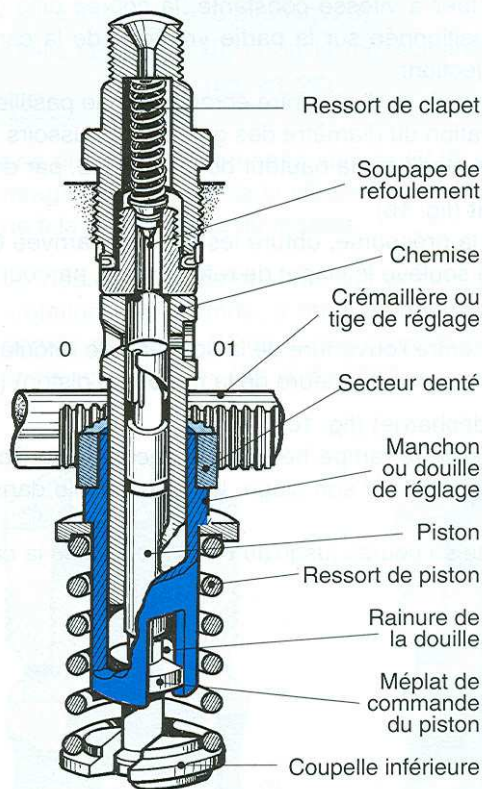


Fig.13.7. Mécanisme de commande de rotation du piston

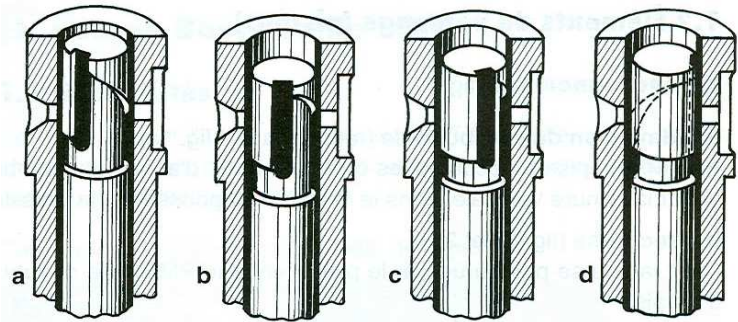


Fig.13.8. Positions de piston dans le cylindre

La quantité de combustible refoulée dépend du temps pendant lequel le piston couvre l'orifice de décharge **01**; c'est la course utile.

Ce temps est modifié par la rotation du piston. Elle fait varier l'instant de la fin du refoulement déterminé par la rampe hélicoïdale.

Les figures 13.8. **a, b, c** montrent les positions de plein débit, de débit moyen et de ralenti. Dans la figure 13.8. **d**, la rainure verticale est en ligne avec l'orifice **01**, aucun refoulement n'est possible, c'est la position d'arrêt ou stop.

Pour obtenir la position désirée de la rampe hélicoïdale, on fait tourner le piston au moyen d'un mécanisme de commande.

#### 2.3.3. Soupape de refoulement

Leur rôle est de détendre rapidement, après chaque injection, la pression dans les tuyauteries HP, afin d'obtenir une fermeture franche de l'injecteur, tout en maintenant une pression résiduelle déterminée.

##### **Soupape à réaspiration**

*Début de refoulement :* le piston de pompe comprime le combustible, la pression d'injection **P** devient supérieure à la pression **P'** (charge du ressort + pression résiduelle) et soulève la soupape. Le combustible s'écoule au moment où le piston de détente dégage l'orifice.

*Fin de refoulement :* le refoulement du combustible cesse lorsque la pression **P** devient inférieure à la pression **P'**. la fermeture de la soupape s'effectue alors en deux phases :

- l'arête inférieure du piston de détente vient en contact avec la partie rectifiée du siège et la communication est interrompue.
- la soupape continue sa retombée jusqu'à la fermeture complète en réaspirant dans la tuyauterie un volume :

$$V = S \times h = \frac{\pi d^2}{4} \times h$$

V – volume de réaspiration

S – surface du piston de détente

h – hauteur de retombée

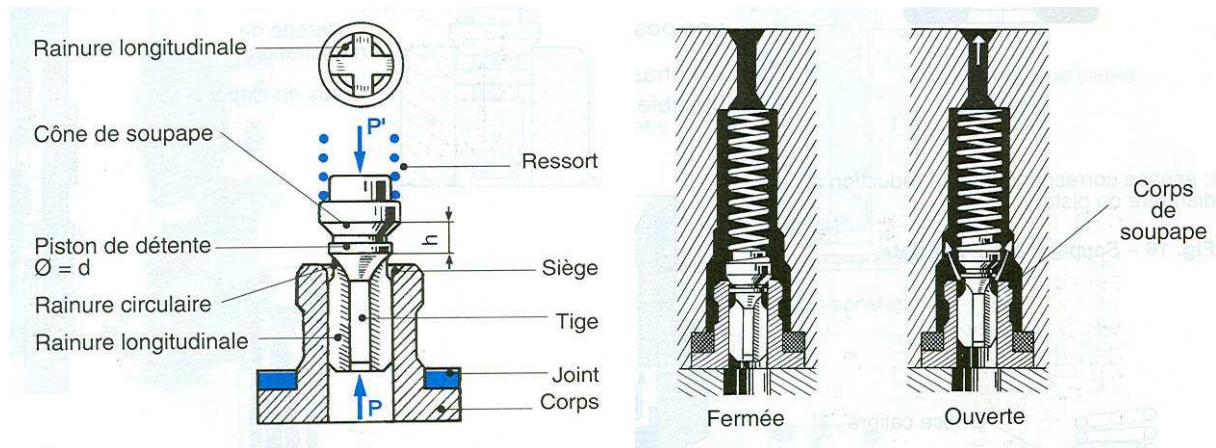


Fig.13.9. Soupape à réaspiration Bosch

### Clapets à billes

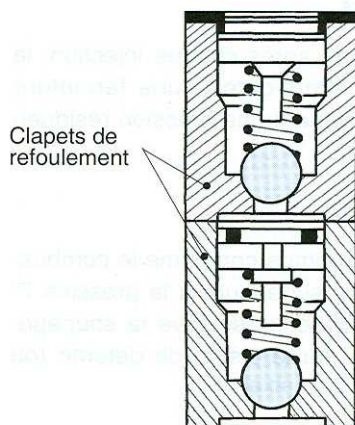


Fig.13.10. Clapets à billes

Ils sont constitués de deux corps superposés comportant chacun une bille.

En fin d'injection, la bille du corps inférieur retombe la première sur son siège et il en résulte une chute de pression dans le corps supérieur. Le combustible contenu dans la tuyauterie de refoulement se détend et entraîne la fermeture de la seconde bille.

## 3. Injecteurs et porte-injecteurs

### 3.1. Rôle et fonctionnement de l'injecteur

L'injecteur ou pulvérisateur est fixé et positionné dans un support dénommé porte-injecteur.

C'est un organe de haute précision qui assure la pulvérisation correcte et la répartition du combustible refoulé par la pompe d'injection, dans la chambre (ou la préchambre selon le cas) de combustion du moteur.

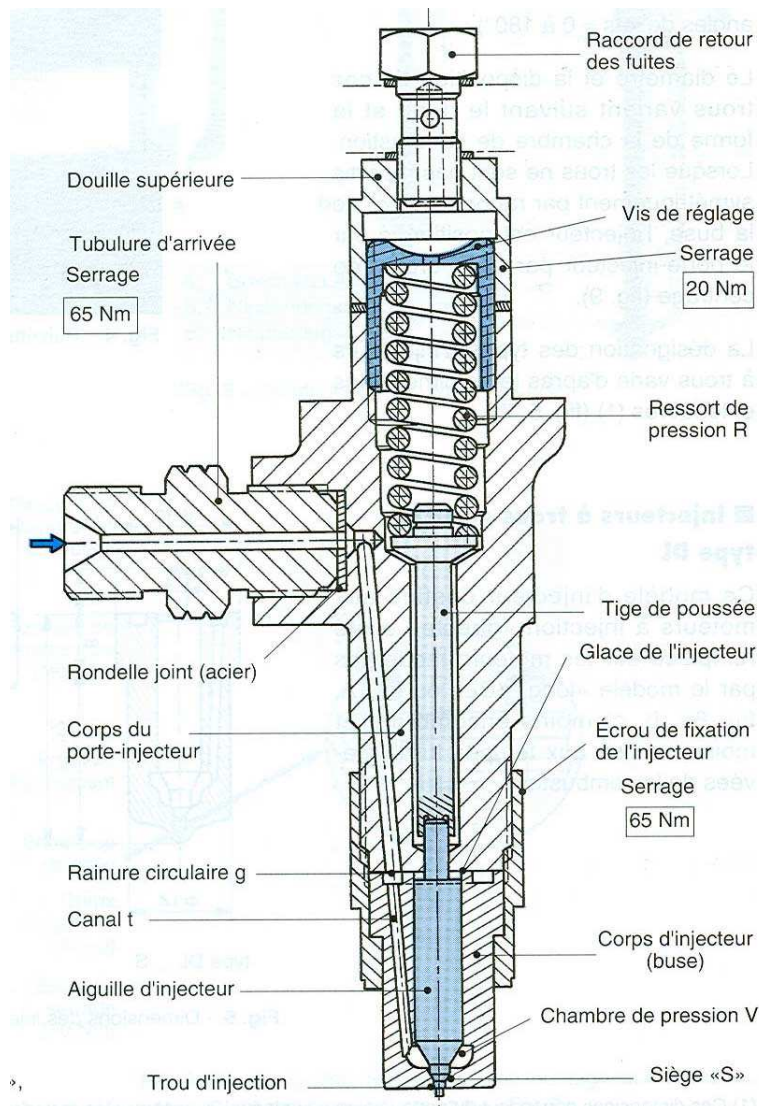


Fig.13.11. Porte-injecteur Lucas-Diesel avec injecteur à téton type DN

### **Fonctionnement :**

L'aiguille est appliquée, au repos sur son siège **S**, par un ressort qui prend l'appui dans le porte-injecteur.

Le gazole arrive par le porte-injecteur dans une gorge circulaire "**g**" puis est dirigé vers la chambre de pression "**V**", par le canal "**t**".

Au moment du refoulement de combustible par la pompe d'injection, une montée en pression très rapide s'effectue dans la chambre de pression **V**, jusqu'à l'instant où l'aiguille se soulève (c'est le début d'injection), exercent alors une force plus importante que la pré-charge du ressort de pression "**R**".

Le combustible est pulvérisé finement, jusqu'à la fin du refoulement de la pompe d'injection, l'aiguille d'injecteur retombe alors sur son siège, plaquée par la force du ressort de pression "**R**" et obture le ou les orifices de la buse d'injecteur (étanchéité parfaite indispensable).

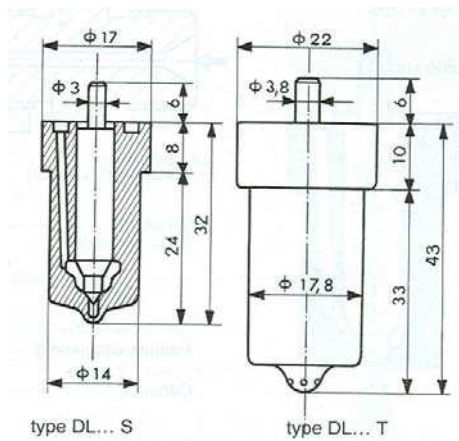
## 3.2. Différents types d'injecteurs

### 3.2.1. Injecteurs à trous

Ce type d'injecteur est utilisé en général sur les moteurs à injection directe car son rôle est essentiellement de répartir le combustible.

L'extrémité de la buse est percée d'un trou central ou de plusieurs trous capillaires dont le diamètre minimal est de 0.2 mm (nombre de trous = 1 à 12, angles de jets = 0 à 180°).

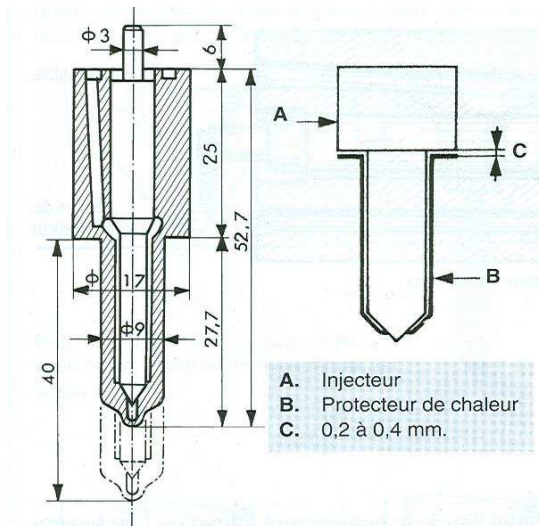
### Injecteurs à trous court type DL



Ce modèle d'injecteur destiné aux moteurs à injection directe a été remplacé sur les moteurs modernes par le modèle long (DLL), moins encombrant et moins exposé aux températures élevées de la combustion.

Fig.13.12. Injecteur Bosch type DL

### Injecteurs à aiguille allongée



Ces injecteurs sont les plus utilisés sur les moteurs à injection directe et le gain de place est important (par exemple lors du montage de l'injecteur entre les soupapes).

Dans certains cas, on cherche à diminuer la surface offerte à l'action des gaz brûlants, afin de réduire l'échauffement de l'injecteur; on monte alors un fourreau "protecteur de chaleur".

Fig.13.13. Injecteur à trous Bosch type DLL avec protecteur de chaleur

#### 3.2.2. Injecteurs à tétons

Ils sont utilisés sur les moteurs à turbulence, car la préparation du mélange combustible est assurée principalement par le tourbillonnement de l'air et facilitée par la forme étudiée du jet d'injection.

La buse est percée d'un trou central de diamètre relativement important  $d = 0.8$  à 3 mm et l'aiguille présente un téton de diamètre légèrement inférieur.

Avec ce dispositif, on obtient un jet conique dont l'angle de dispersion  $\alpha$  dépend de la forme du téton de l'aiguille. En outre, le téton empêche tout dépôt de calamine sur le trou d'injection.

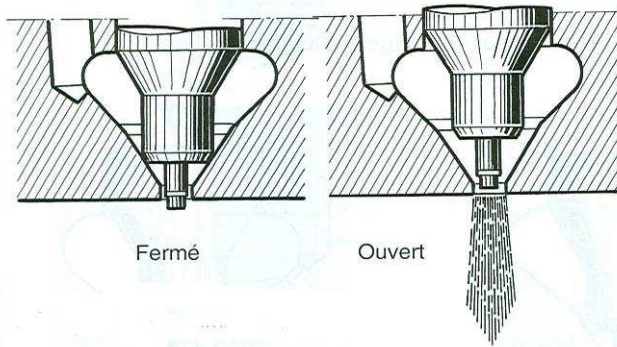


Fig.13.14. Injecteurs à téton à extrémité cylindrique

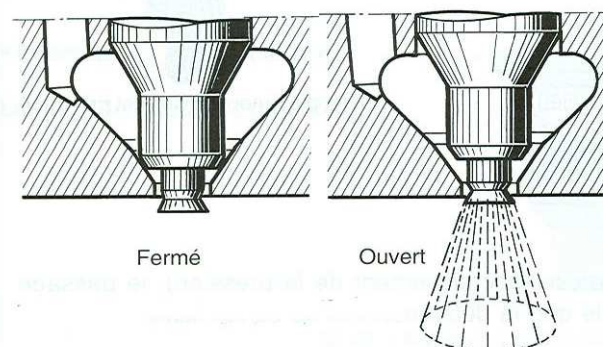


Fig.13.15. Injecteurs à téton à extrémité conique

### 3.2.3. Injecteurs à étranglement

Dans ce type d'injecteur, la forme particulière du téton de l'aiguille et un ressort spécial dans le porte-injecteur permettent d'obtenir une "préinjection".

Au moment de l'ouverture, l'aiguille découvre en premier lieu un étroit passage annulaire qui laisse pénétrer très peu de combustible (effet de l'étranglement).

Au fur et à mesure que le mouvement d'ouverture progresse (accroissement de la pression), le passage s'élargit et ce n'est que vers la fin de la course de l'aiguille que le débit maximal de combustible est injecté.

C'est actuellement le type le plus employé sur les moteurs rapides de faible cylindrée, à injection indirecte.

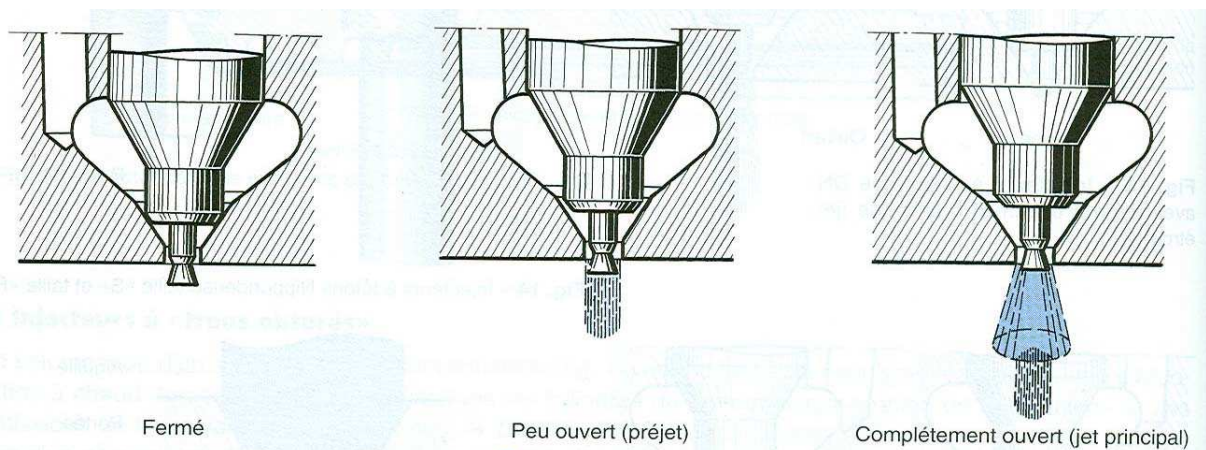
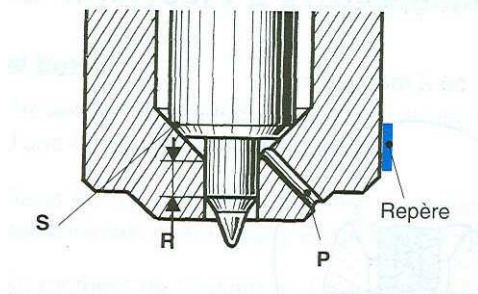


Fig.13.16. Injecteurs à étranglement type DN Bosch à téton conique

### 3.2.4. Injecteurs à trous pilote



C'est un injecteur à téton à grand recouvrement "R", dont la buse est percée d'un trou capillaire oblique "P" qui débouche sous le siège de l'aiguille "S".

Il est utilisé sur des culasses à préchambres.

Fig.13.17. *Injecteur à trou pilote*

#### **Fonctionnement :**

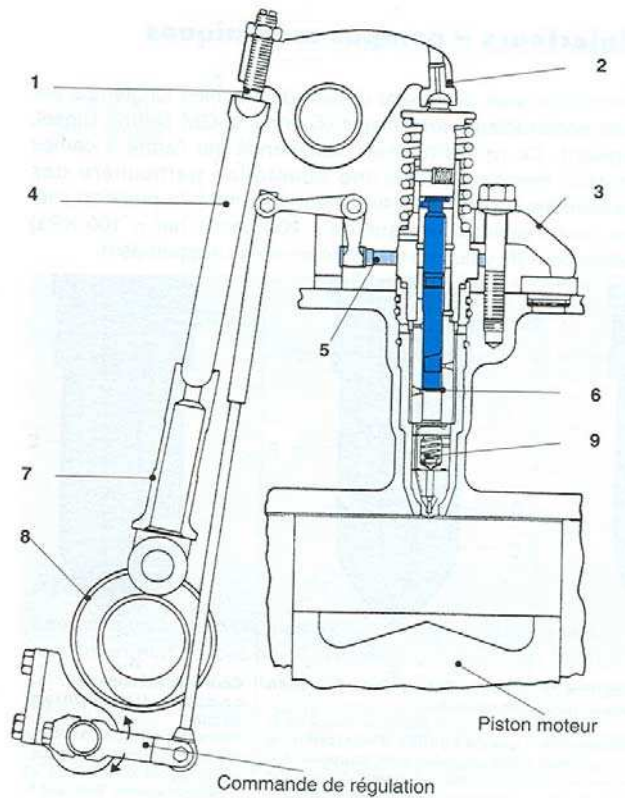
Aux faibles régimes du moteur et surtout à la vitesse d'entraînement du démarreur, l'injecteur se lève lentement et d'une valeur souvent inférieure à sa levée maximale : la plus grande partie du débit a le temps d'être évacuée par le trou pilote, le téton étant encore étanche sur son recouvrement. L'injecteur fonctionne comme un injecteur à trou. Cet injecteur comporte un trait repère qui doit être positionné face au raccord d'arrivée sur le porte-injecteur.

## 4. Injecteurs-pompes et systèmes électroniques

### 4.1. Injecteurs-pompes

#### 4.1.1. Injecteurs-pompes mécaniques

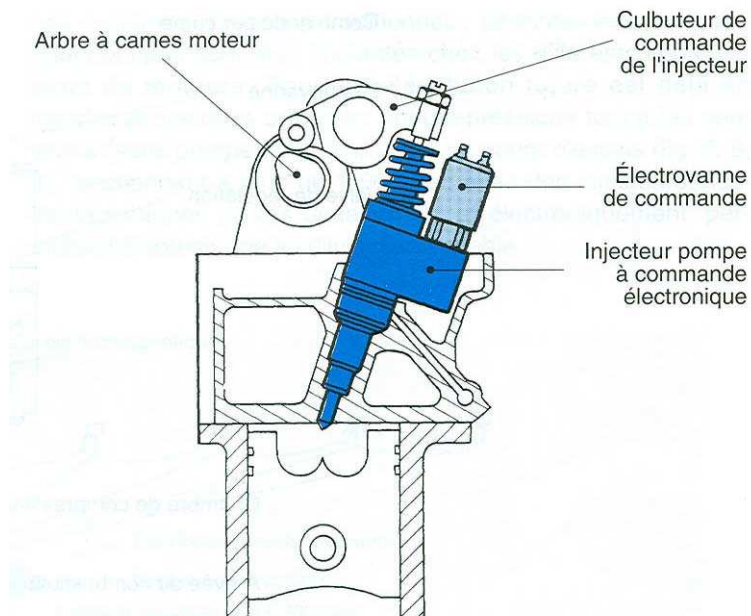
Ces injecteurs sont connus et utilisés depuis bien longtemps par certains constructeurs américains (GM Détroit Diesel, Caterpillar). Ce type d'injection, commandé par l'arbre à cames du moteur demande donc une adaptation particulière des culasses, mais comporte un argument important : la pression d'injection peut s'élever au-dessus de 1200 bars.



1. Vis de réglage
2. Culbuteur
3. Bride de fixation
4. Tige de poussée
5. Crémaillère
6. Élément de refoulement
7. Poussoir à galet
8. Arbre à cames
9. Injecteur

Fig.13.18. *Système d'injecteur-pompe 3500 Caterpillar*

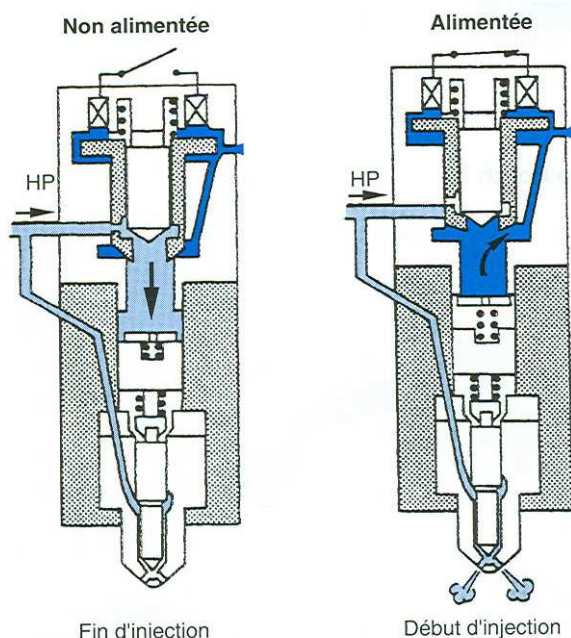
#### 4.1.2. Injecteurs-pompes à commande électronique



La recherche de puissance, liée aux impératifs de dépollution des moteurs diesel nouveaux, demande des pressions d'injection de plus en plus élevées et favorise le développement de ce produit, avec bien entendu non plus un dosage à commande mécanique, mais en pilotant une électrovanne à l'aide d'un système électronique (début, fin, durée, moment d'injection variables à commande unitaire).

*Fig.13.19. Système d'injecteur-pompe à commande électronique*

#### 4.2. Nouveaux systèmes d'injection Diesel



Les systèmes d'injection traditionnels, assistés désormais par l'électronique, sont bien implantés chez les différents constructeurs de moteurs.

Pourtant, l'évolution future est déjà en marche et quelques systèmes "haute pression" tout à fait nouveaux (sans pompe d'injection) sont en cours d'essais, fonctionnant à plus de 1000 bars, avec des injecteurs électromagnétiques pilotés unitairement et électroniquement, permettant d'obtenir une loi d'injection variable.

*Fig.13.20. Fonctionnement d'un injecteur électromagnétique*

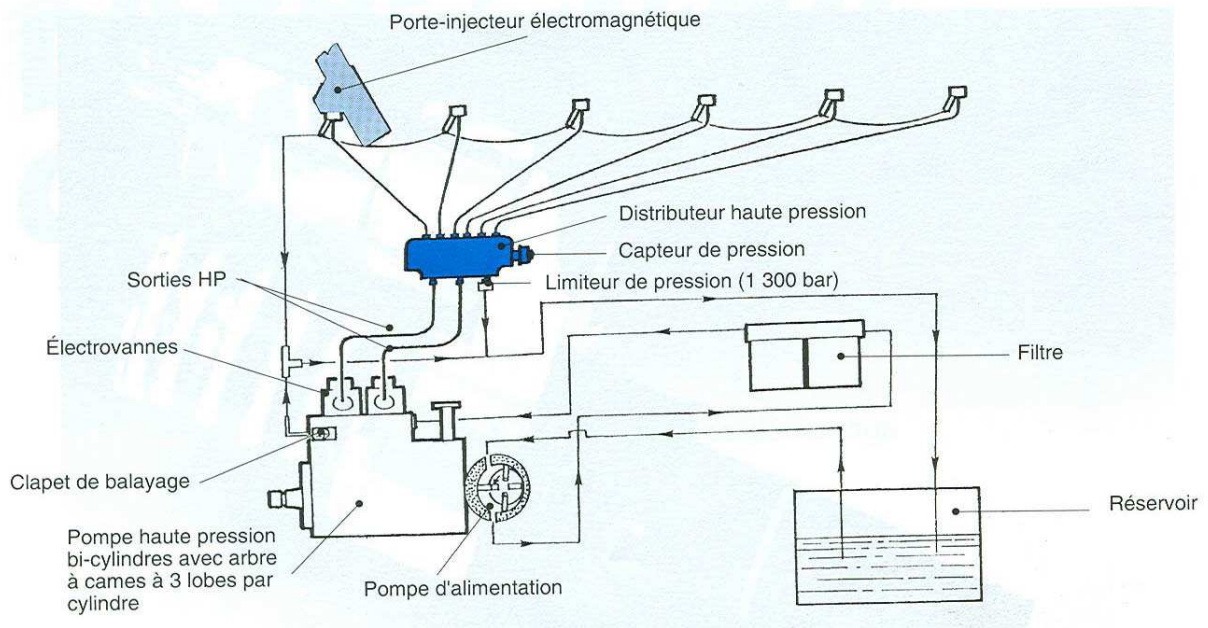
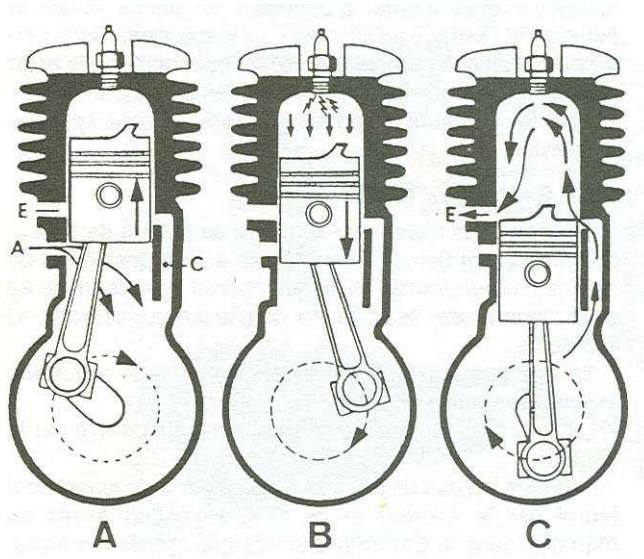


Fig.13.21. Système haute pression Nippondenso

## MOTEURS À CYCLE DEUX TEMPS

### 1. Fonctionnement

Le moteur à 2 temps réalise le cycle Beau de Rochas (aspiration, compression, détente, échappement) en 2 courses de piston au lieu de 4 courses prévues dans le moteur 4 temps.



- A. Admission dans le carter et compression dans le cylindre.
- B. Compression dans le carter et explosion-détente dans le cylindre.
- C. Transfert carter/cylindre et échappement du cylindre

Fig.15.1. Moteur 2 temps à compression dans le carter

**1<sup>er</sup> temps** (du PMB au PMH):

Le piston étant au PMB, le mélange air-essence est introduit sous une faible pression de 1.2 à 1.4 bars. Au 1/7 environ de sa course, le piston ferme les lumières pour permettre la compression.

**2<sup>ème</sup> temps** (du PMH au PMB) :

La combustion commence un peu avant le PMH; après le PMH, la descente du piston réalise le "temps moteur". Au 6/7 environ de sa course, le piston découvre l'orifice d'échappement pour permettre l'évacuation des gaz brûlés.

PMB.

### 2. Cycle à 2 temps

2.1. Cycle Dans les moteurs 2 temps à lumières, les opérations d'admission et d'échappement ont une durée très réduite et elles s'effectuent toutes les deux au voisinage du théorique

Le piston part de PMB au point "A", les lumières de transfert étant découvertes et les gaz frais préalablement comprimés dans le carter. C'est la phase "admission"

jusqu'au point "B" qui correspond à la fermeture des lumières de transfert et d'échappement.

La compression s'exerce jusqu'au point "C" où se produit l'allumage, au voisinage du PMH; et la pression monte brusquement jusqu'en "D". C'est alors la détente qui correspond à la phase "DE", le point "E" correspondant à l'ouverture de la lumière d'échappement. La pression tombe brusquement jusqu'en "B".

Le piston termine sa course descendante "EA" avant de recommencer un nouveau cycle. La phase "EAB" correspond au balayage des gaz brûlés qui n'ont pas fini d'être évacués par les gaz frais qui ont commencé à pénétrer dans le cylindre par les canaux de transfert.

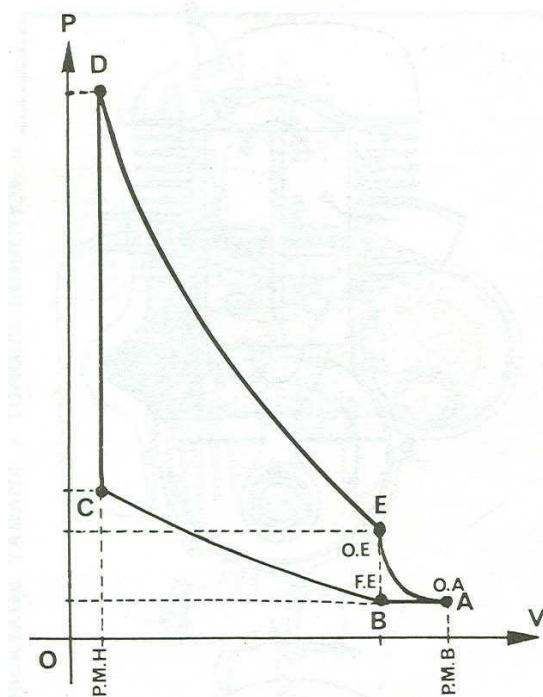


Fig.15.2. Cycle théorique du moteur 2 temps

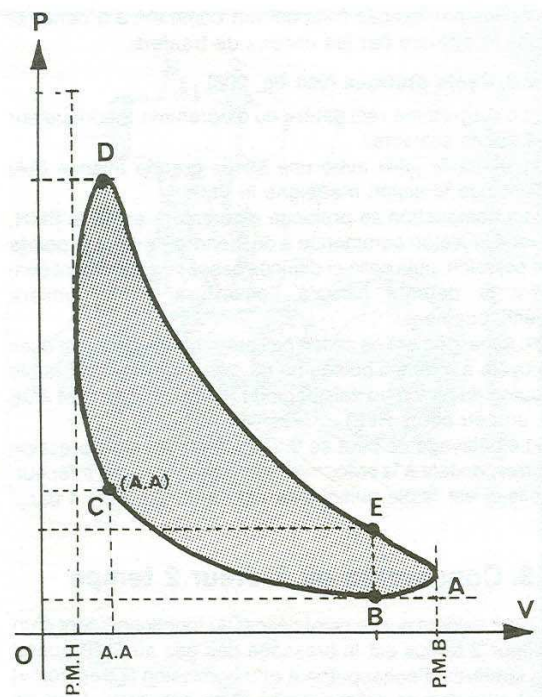


Fig.15.3. Cycle pratique du moteur 2 temps

## 2.2. Cycle pratique

Le diagramme réel diffère du diagramme théorique sur les points suivants :

- L'étincelle jaillit avec une assez grande avance (AA) avant que le piston n'atteigne le PMH.
- La combustion se prolonge légèrement après le PMH, quand le piston commence à descendre; il y a une pointe de pression, puis celle-ci diminue assez régulièrement pendant la détente jusqu'à l'ouverture de la lumière d'échappement.
- L'échappement ne se fait pas aussi rapidement que dans le cycle à 4 temps puisqu'on ne dispose que d'une faible course du piston au voisinage du PMB.
- Le balayage ne peut se faire qu'avec la faible pression correspondant à la précompression dans le carter inférieur. Celle-ci est faible puisqu'elle est de l'ordre de 1.4 bars.

### 3. Avantages et inconvénients du moteur à 2 temps

#### 3.1. Avantages

- Accélération plus vite car le temps moteur s'effectue dans un tour de vilebrequin,
- La distribution sans soupape permet d'augmenter la vitesse de rotation du moteur sans risque d'affolement,
- La régularité des poussées sur le vilebrequin diminue les à-coups et les vibrations, notamment en monocylindre. La masse du volant peut ainsi être réduite.

#### 3.2. Inconvénients

- La compression est commencée plus tardivement, la combustion est plus lente et produit des résidus nombreux ainsi qu'une fumée d'huile à l'échappement.
- Pertes de puissance proviennent du mélange possible des gaz frais et des gaz brûlés
- Consommation plus de combustible par rapport au moteur à 4 temps.

## MOTEUR WANKEL À PISTON ROTATIF

### 1. Description du moteur Wankel

Le moteur rotatif Wankel est le résultat d'une importante étude menée de 1945 à 1954 par l'ingénieur Wankel sur les différentes solutions de moteur rotatif.

Les premières recherches expérimentales effectuées sur le plan industriel à partir des brevets Wankel ont été faites par la firme allemande NSU en 1957.

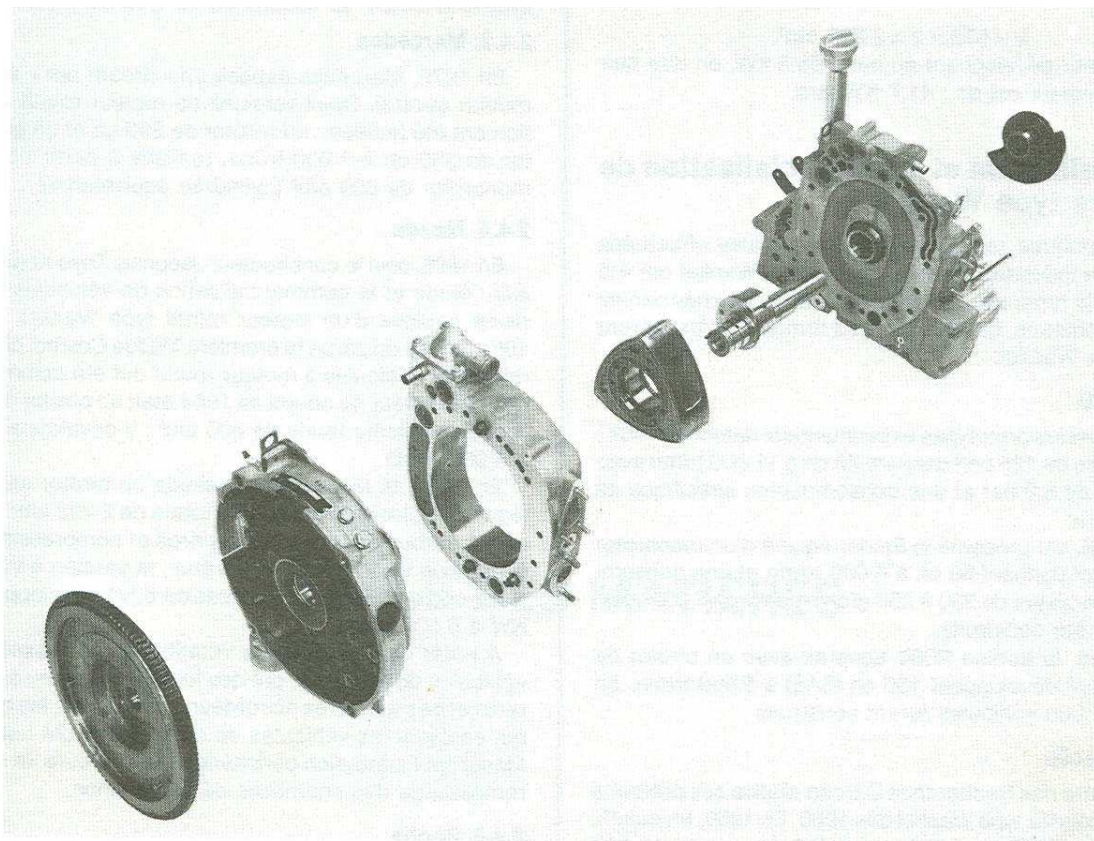
Applications de ce type de moteur ont été faites plutard par les constructeurs de véhicules Citroën, Mercedes, Mazda, Sachs, etc.

Un piston rotatif appelé rotor, ayant la forme d'un triangle équilatéral curviligne, se déplace en rotation dans un stator ou trochoïde de profil particulier appelé épitrochoïde.

Le piston dans son déplacement produit les variations de volume nécessaires à la réalisation des phases du cycle.

Le rotor roule sans glissement sur un pignon tournant dont l'axe est solidaire du carter moteur. Le rotor entraîne en rotation un arbre excentré (vilebrequin) solidaire de l'arbre moteur.

Grâce à cette disposition, la poussée des gaz sur chaque face du rotor est transformée en couple sur l'arbre moteur.



*Fig.16.1. Vue éclatée du moteur Wankel monocylindre*

## 2. Principe du moteur Wankel

### 2.1. Cinématique

Considérons un cercle fixe de centre  $O$  et rayon  $r$ , et un second cercle de centre  $O'$  et rayon  $r'$  qui roule sans glisser à l'extérieur du cercle  $O$ . Un point  $M$  du cercle  $O$  décrit une courbe appelée épicycloïde et un point  $M'$  pris à l'extérieur du cercle  $O$ , mais lié à celui-ci, décrit une "épitrochoïde".

L'épitrochoïde a permis d'obtenir des chambres à volume variable, permettant d'accomplir le cycle à 4 temps.

Pour que le rotor puisse se déplacer à l'intérieur de cette courbe, il faut qu'il soit monté sur un arbre excentrique permettant de transmettre le couple moteur. Le guidage du rotor en rotation est assuré par sa couronne à denture intérieure qui engène avec un piston fixe porté par le stator; ce pignon fixe représente le cercle  $O$  et la denture intérieure le cercle  $O'$ .

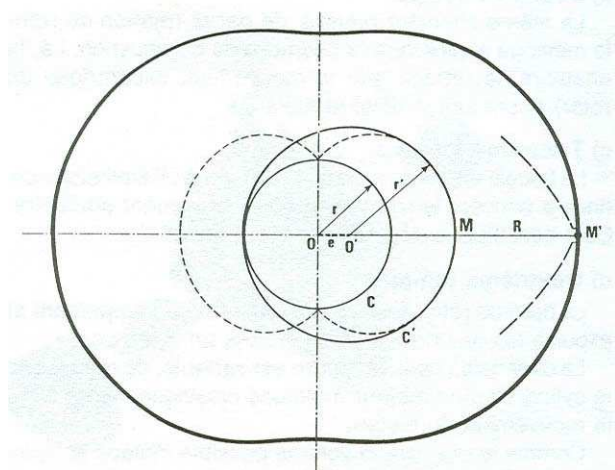
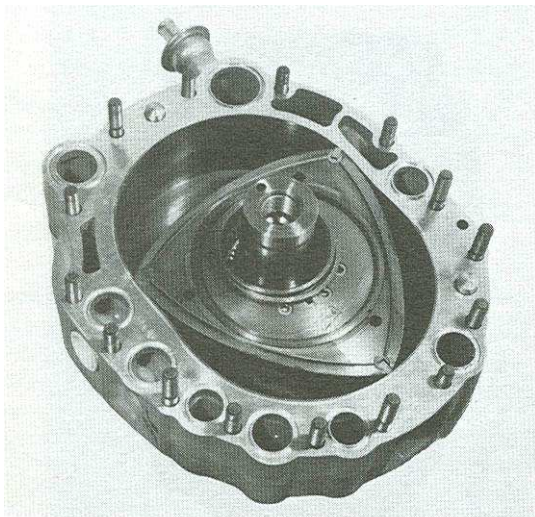


Fig.16.2. Principe du moteur Wankel

### 2.2. Cycle du moteur Wankel

Le moteur à piston rotatif Wankel est un véritable moteur à 4 temps, réalisant comme n'importe quel moteur à pistons classiques les 4 temps : aspiration, compression, explosion-détente, échappement.

Une différence essentielle avec le moteur à pistons classiques réside dans le fait que ce moteur réalise toujours trois temps simultanément.

a) **Premier temps :**

Lorsque la première chambre du moteur s'agrandit, elle aspire le mélange essence/air.

b) **Deuxième temps :**

La même chambre pousse, par la rotation du rotor, le mélange aspiré vers la chambre de combustion. Là, la chambre se rétrécit (par le mouvement excentrique du rotor) et comprime ainsi le mélange.

c) *Troisième temps* :

La bougie allume le mélange comprimé; l'explosion continue à pousser le rotor dans son mouvement circulaire.

Ceci constitue le véritable temps moteur.

d) *Quatrième temps* :

Le bord du rotor découvre la lumière d'échappement et expulse les gaz brûlés comme dans un 2 temps.

La dimension de la chambre est variable, de même que la cylindrée d'un moteur à pistons classiques varie avec le mouvement du piston.

Comme le plus grand volume possible indique la cylindrée nominale du moteur classique, le volume nominal de la chambre correspond au plus grand volume possible de la chambre d'explosion du moteur rotatif.

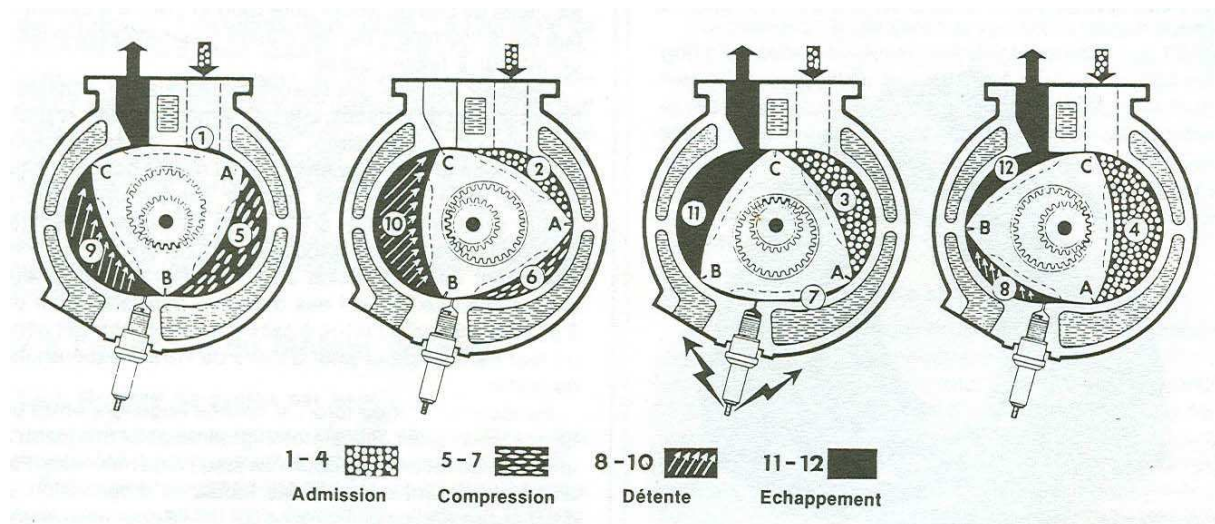


Fig.16.3. Cycle du moteur Wankel

### 3. Cylindrée du moteur Wankel

#### 3.1. Nombre de cycles par tour

La cinématique du moteur Wankel est telle que l'arbre moteur fait 3 tours quand le rotor fait un tour complet.

Etant donné que chacune des 3 faces du rotor travaille, nous aurons 3 admissions, 3 explosions-détentes, 3 échappements pour un tour de rotor. Comme l'arbre moteur tourne 3 fois plus vite, tout se passe comme s'il y avait un cycle complet donc un temps moteur par tour d'arbre.

Un moteur Wankel monorotor peut donc se comparer à un moteur 2 cylindres 4 temps à piston alternatif.

### 3.2. Cylindrée unitaire et cylindrée équivalente

La cylindrée unitaire est la différence entre les volumes maximum  $V$  et minimum  $v$  compris entre rotor et trochoïde pendant le déplacement du rotor. Compte tenu du fait que le moteur Wankel effectue un cycle thermodynamique complet en **3** tours d'arbre moteur et le moteur à piston alternatif en **2** tours de vilebrequin, on considère que la cylindrée engendrée par une chambre du rotor est :  $\frac{2}{3}(V-v)$ ;

Puisque le rotor comporte **3** chambres, sa cylindrée, pour un rotor sera donc :

$$\frac{2}{3}(V-v)3 = 2(V-v)$$

La cylindrée équivalente (totale) attribuée au moteur Wankel en comparaison d'un moteur classique est :  $2(V-v)n$ .

Où :  $n$  étant le nombre de rotors.

*Par exemple* : la cylindrée équivalente du moteur de la Mazda-RX 7 est :  
 $2 \times 573 \times 2 = 2\,292 \text{ cm}^3$ .

## 4. Avantages et inconvénients du moteur Wankel

### 4.1. Avantages

- Moins d'encombrement (pas de bielle, pas de soupape, ...),
- Régularité de fonctionnement et grande souplesse d'utilisation,
- Transformation du mouvement plus satisfaisante sur le plan mécanique.

### 4.2. Inconvénients

- La conception des segments d'arrête pose des problèmes difficiles à résoudre,
- L'évacuation des calories en excédent est plus difficile à réaliser et nécessite un dispositif de refroidissement par eau très efficace.
- Les formes des pièces en mouvement (rotor, stator, ...) sont compliquées, difficulté d'usinage, donc prix élevé.