



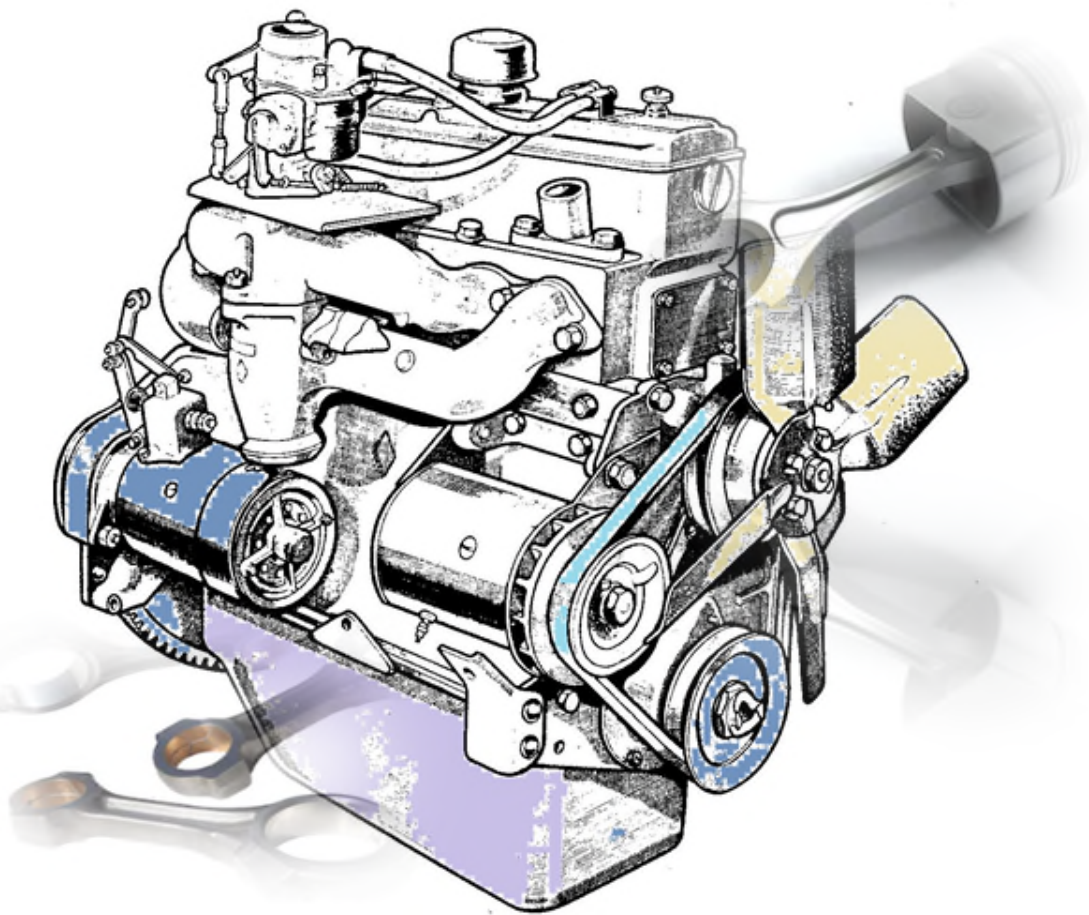
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MASCARA  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

2018/2019

TECHNOLOGIE DU MOTEUR A COMBUSTION  
INTERNE A L'USAGE DES ETUDIANTS DE GENIE  
MECANIQUE



## Préface

La construction des moteurs à combustion interne a été naturellement inespérée par les éléments des moteurs à vapeur, utilisés pour les véhicules automobiles routiers, transformé par la suite pour l'emploi du pétrole et de l'essence de pétrole. Cette invention tellement importante pour l'économie et la technologie en particulière a bénéficié d'un progrès réalisé antérieurement, utilisant la soupape comme système d'ouverture et d'obturation du moteur. Jusqu'à présent, les progrès n'ont pas cessé sur le développement de la technologie des automobiles, en particulier le moteur, surtout sur les performances, la fiabilité, la conception, le confort et surtout la sécurité des usagers.

Ce document s'adresse plus particulièrement aux étudiants des sciences de technologies, mais pourra être également un outil à toute personne qui aura de la volonté d'acquérir des connaissances sur les moteurs à combustion interne.

Ce présent document est divisé en sept volets principaux à savoir, une brève description sur la construction de l'automobile, l'étude technologique du moteur à combustion interne, la distribution, le graissage du moteur à combustion interne, le moteur à injection, les combustibles pour moteur d'automobile et enfin, détermination de la puissance développée par le moteur.

Préface

***Chapitre I : Historique et description de l'automobile***

|  |   |
|--|---|
| I. Préliminaires                             | 1 |
| I.1 Définition                               | 1 |
| I.2 Description                              | 1 |
| I.3 Historique de l'automobile               | 1 |
| I.4 Classification des véhicules automobiles | 2 |
| I.4.1 L'utilisation du véhicule automobile   | 2 |
| I.4.2 Position moteur et roues               | 2 |
| I.4.3 Types de carrosseries                  | 2 |
| I.5 Eléments d'automobile                    | 3 |
| I.5.1 Description                            | 3 |
| I.5.2 châssis                                | 4 |
| I.5.2.1 Qualités d'un châssis                | 4 |
| I.5.2.2 Efforts supportés par un châssis     | 5 |
| a. Châssis classique                         | 5 |
| b. Châssis tubulaire                         | 5 |
| c. Châssis poutre                            | 5 |
| d. Châssis coque                             | 5 |

***Chapitre II : étude technologique du moteur à combustion interne***

|   |    |
|---|----|
| II.1 Moteur à combustion interne                                | 6  |
| II.1.1 Définition   | 6  |
| II.2 Classification des moteurs                                 | 6  |
| II.3 Étude du moteur à explosion monocylindrique à quatre temps | 7  |
| II.3.1 Principe de fonctionnement                               | 7  |
| II.3.2 Caractéristiques mécaniques d'un moteur                  | 9  |
| II.3.3 Fonctionnement du moteur à quatre temps                  | 9  |
| II.3.3.1 Définition   | 9  |
| II.3.3.2 Étude du cycle à quatre temps                          | 10 |
| II.3.3.3 Diagramme théorique du cycle « beau de rochas »        | 10 |
| a. Admission  | 11 |
| b. Compression  | 11 |
| c. Explosion et détente   | 11 |
| d. Echappement  | 11 |

---

|  |    |
|--|----|
| II.3.3.4 Étude du cycle réel   | 12 |
| a. 1 <sup>ère</sup> temps : admission                                | 13 |
| b. 2 <sup>ème</sup> temps: compression                               | 13 |
| c. 3 <sup>ème</sup> temps : explosion et détente Avance à l'allumage | 13 |
| d. 4 <sup>ème</sup> temps : échappement                              | 14 |
| II.3.3.5 Diagramme pratique  | 14 |
| II.3.3.6 Amélioration du rendement d'un cycle à quatre temps         | 15 |
| II.4 Moteur monocylindrique  | 16 |
| II.4.1 Fonction du bloc cylindre                                     | 16 |
| II.4.2 Différents types de parois des cylindres                      | 17 |
| a. Type (A)  | 17 |
| b. Type (B)  | 17 |
| c. Type(C)   | 18 |
| II.4.3 Organes de distributions                                      | 19 |
| II.4.4 Disposition des axes des cylindres                            | 19 |
| II.4.4.1 Moteur en ligne   | 19 |
| II.4.4.2 Moteur en « V »   | 20 |
| II.4.4.3 Moteur à plat   | 20 |
| II.5 culasse   | 21 |
| II.5.1 Rôle  | 21 |
| II.5.2 Constitution de la culasse                                    | 21 |
| II.5.3 Assemblage de la culasse au bloc-cylindres                    | 21 |
| II.6 Le piston, la bielle, le vilebrequin, le volant moteur          | 22 |
| II.6.1 piston  | 22 |
| II.6.1.1Rôle   | 22 |
| II.6.1.2 Efforts supportés par le piston                             | 22 |
| II.6.1.3 Constitution d'un piston                                    | 23 |
| II.6.1.4 Types de piston   | 24 |
| II.6.1.5 Les segments  | 26 |
| II.6.1.5.1 Nombre et nature des segments                             | 26 |
| II.6.1.5.2 Segments spéciaux   | 26 |
| II.6.1.6 l'axe de piston   | 26 |
| II.6.2 La bielle   | 27 |
| II.6.2.1 Rôle  | 27 |
| II.6.2.2 Description   | 27 |
| II.6.2.3 Efforts et formes résultantes                               | 27 |

---

|  |    |
|--|----|
| II.6.2.3.1 Corps                       | 27 |
| II.6.2.3.2 Articulations               | 28 |
| II.6.2.4 Coussinets minces             | 28 |
| II.6.2.5 Bielle pour moteurs en »V »   | 30 |
| II.6.3 vilebrequin (arbre moteur)      | 30 |
| II.6.3.1 Rôle                          | 30 |
| II.6.3.2 Efforts et construction       | 30 |
| II.6.3.3 Eléments d'un vilebrequin     | 31 |
| II.6.3.4 Disposition des éléments      | 31 |
| II.6.3.5 Montage du vilebrequin        | 33 |
| II.6.4 volant moteur                   | 34 |
| II.6.4.1 Rôle                          | 34 |
| II.6.4.2 Constitution du volant moteur | 34 |
| II.6.4.3 Montage                       | 35 |
| II.6.4.4 Dispositifs d'entraînement    | 35 |

### ***Chapitre III : La distribution***

|   |    |
|---|----|
| III.1 rôle  | 36 |
| III.2 types de distribution                       | 36 |
| III.3 moteur a soupapes                           | 36 |
| III.3.1 Soupape                                   | 36 |
| III.3.2 Commande du poussoir de la tige           | 37 |
| III.3.3 Arbre à came au-dessus, soupapes en tête  | 38 |
| III.3.4 Arbre à cames de côté, soupapes latérales | 38 |
| III.3.5 Arbre à cames de côté, soupapes en tête   | 38 |
| III.3.6 Jeu entre came et poussoir                | 38 |
| III.3.7 Commande de l'arbre à cames               | 39 |
| III.3.7.1 Vitesse de rotation                     | 39 |
| III.3.7.2 Dispositifs employés                    | 40 |
| III.4 Moteur sans soupapes                        | 41 |
| III.4.1 Fonctionnement                            | 41 |
| III.4.2 Ordre de fonctionnement des cylindres     | 41 |
| III.4.3 moteur à quatre cylindres                 | 42 |
| III.4.4 moteur à six cylindres                    | 44 |
| III.4.5 moteur à huit cylindres                   | 44 |
| III.4.5.1 Huit cylindres en ligne                 | 44 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| III.4.5.2 Huit cylindres en V à 90° | 45 |
|-------------------------------------|----|

## Chapitre IV : Graissage

|   |    |
|---|----|
| IV.1 Frottement   | 46 |
| IV.2 Types de frottement                                    | 46 |
| IV.2.1 Frottement à sec                                     | 46 |
| IV.2.2 Frottement onctueux                                  | 46 |
| IV.2.3 Frottement hydrodynamique                            | 47 |
| IV.3 Propriétés des lubrifiants                             | 47 |
| a. La viscosité   | 48 |
| b. L'onctuosité   | 48 |
| c. La stabilité   | 48 |
| d. point de congélation très basse                          | 48 |
| e. point d'inflammation très élevé                          | 48 |
| IV.4 Principaux lubrifiants                                 | 49 |
| IV.4.1 Les huiles végétales (huile de ricin en particulier) | 49 |
| IV.4.2 Les huiles minérales (extraites du pétrole)          | 49 |
| IV.4.3 Les graisses consistantes                            | 49 |
| IV.4.4 Le graphite  | 49 |
| IV.5 Étude des surfaces                                     | 49 |
| IV.5.1 Matériaux utilisés                                   | 49 |
| IV.5.2 États des surfaces                                   | 50 |
| IV.5.3 Tolérances sur les côtes ajustées                    | 50 |
| IV.6 Modes de graissage                                     | 50 |
| IV.6.1 Lubrification perdue                                 | 50 |
| IV.6.2 Lubrification récupéré                               | 50 |
| IV.6.3 Adduction du lubrifiant                              | 51 |
| IV.6.4 Par pompe et canalisations                           | 52 |
| IV.7 Étanchéité   | 53 |
| IV.8 Filtrage   | 53 |
| IV.9 Refroidissement d'huile                                | 54 |
| IV.9.1 Carbonisation  | 55 |
| IV.10 refroidissement                                       | 55 |
| IV.10.1 Dispositifs de refroidissement                      | 56 |
| IV.10.2 refroidissement par air                             | 56 |
| IV.10.3 Refroidissement mixte par eau et par air            | 57 |

---

|  |    |
|--|----|
| IV.10.4 Circulation de l'eau               | 57 |
| IV.10.5 Circulation naturelle              | 57 |
| IV.10.6 Circulation forcée                 | 58 |
| IV.10.7 Refroidissement « eau /radiateur » | 58 |
| IV.10.8 Types de radiateurs                | 59 |
| a. Radiateur tubulaire                     | 59 |
| b. Radiateur à ailettes                    | 59 |
| c. Radiateur nid d'abeilles                | 59 |

### *Chapitre V : Moteur à injection*

|   |    |
|---|----|
| V.1 Introduction                          | 61 |
| V.2 Cycle diesel théorique à quatre temps | 61 |
| V.2.1 Temps admission                     | 61 |
| V.2.2 Compression                         | 61 |
| V.3 Cycle diesel pratique                 | 62 |
| V.3.1 Injection et détente                | 62 |
| V.3.2 Échappement                         | 62 |
| V.4 Cycle diesel pratique                 | 63 |
| V.4.1 Avantages du moteur diésel          | 63 |
| V.4.2 Inconvénients                       | 64 |
| V.4.3 Principe du moteur diésel           | 64 |
| V.5 Injecteur                             | 64 |
| V.5.1 Rôle                                | 64 |
| V.5.2 Mélange combustible/ comburant      | 65 |
| V.6 Types d'injection                     | 67 |
| V.6.1 Injection directe                   | 67 |
| V.6.2 Moteur à chambre de précombustion   | 67 |
| V.6.2.1 Principe de fonctionnement        | 67 |
| V.6.3 Moteur a réserve d'air              | 67 |
| V.6.3.1 Principe de fonctionnement        | 67 |
| V.7 Pompe à injection                     | 68 |
| V.7.1 Rôle                                | 68 |
| V.7.2 Organes d'une pompe à injection     | 68 |
| V.7.3 Étude de la commande du piston      | 69 |
| V.7.4 Réglage du début d'injection        | 69 |
| V.7.4.1 Dosage du débit                   | 69 |

---

|                          |    |
|--------------------------|----|
| V.7.4.2 Dosage en poids  | 69 |
| V.7.4.3 Dosage en volume | 69 |

***Chapitre VI : combustibles pour moteur à combustion interne***

|  |    |
|--|----|
| VI.1 Caractéristiques des combustibles       | 71 |
| VI.2 Origine et utilisation des combustibles | 71 |
| VI.3 Pétrole brut ou naphte                  | 72 |
| VI.3.1 Traitement du pétrole brut            | 72 |
| VI.3.2 Distillation                          | 72 |
| VI.3.3 Raffinage                             | 72 |
| VI.3.4 Cracking ou craquage des pétroles     | 72 |
| VI.3.5 Combustibles gazeux                   | 73 |

***Chapitre: Puissance d'un moteur***

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| VII.1 Puissance fiscale               | 74 |
| VII.2 Puissance réelle                | 74 |
| VII.3 Rendement d'un moteur           | 75 |
| VII.3.1 Rendement global d'un moteur  | 75 |
| VII.3.2 Bilan des pertes              | 75 |
| VII.3.2.1 Pertes d'échappement $P_1$  | 75 |
| VII.3.2.2 Pertes internes $P_2$       | 75 |
| VII.3.2.3 Pertes externes $P_3$       | 76 |
| VII.3.2.4 Rendements partiels         | 76 |
| VII.3.2.4.1 Rendement théorique $r_1$ | 76 |
| VII.3.2.4.2 Rendement du cycle $r_2$  | 76 |
| VII.3.2.4.3 Rendement mécanique $r_3$ | 76 |
| Bibliographies                        | 77 |



## I. Préliminaires

### I.1 Définition

Une automobile est un véhicule qui se déplace sur la route par ses propres moyens, en utilisant généralement l'énergie d'un combustible.

### I.2 Description

Les véhicules automobiles sont utilisés à des fins très diverses (tourismes, transport en commun, camionnage...), mais on retrouve toujours les mêmes éléments; nous allons les énumérer en précisant leur rôle:

- **la carrosserie** renferme les personnes ou les marchandises;
- **le moteur** fournit l'énergie mécanique;
- **la transmission** (embrayage, boîte de vitesses, différentiel) communique cette énergie aux roues motrices;
- **les roues** prennent appui sur le sol, et permettent au véhicule de se déplacer;
- **la suspension** absorbe les chocs dus aux inégalités de la route et transmis par les roues;
- **l'ensemble de la direction** permet d'agir sur les roues;
- **le système de freinage** dont le rôle est d'arrêter rapidement le véhicule;
- **un équipement électrique**, indispensable pour le fonctionnement du moteur, l'éclairage et la commande de divers accessoires;
- **un châssis**, constituant l'ossature du véhicule, supporte et assemble les différentes parties.

### I.3 Historique de l'automobile

- **1769** : l'ingénieur militaire CUGNOT construit le premier véhicule automobile, utilisant la vapeur d'eau comme force motrice.
- **1821** : Apparition de premières diligences à vapeurs en Angleterre.
- **1860** : Premier moteur à deux temps fixe fonctionnant au gaz d'éclairage, réalisé par LENOIR.
- **1862** : BEAU-DE-ROCHAS invente le cycle à quatre temps.
- **1870** : L'ingénieur OTTO réalise pratiquement le cycle à quatre temps.
- **1881** : le Français, FERNAND FOREST construit un moteur vertical sans soupapes, refroidi par air.
- **1885** : ils ont utilisés le pétrole et l'essence.<sup>4</sup>
- **1888** : L'allemand BENZ, construit une voiture légère roulant à la vitesse maximum de 20 km/h. Moteur arrière à pétrole et le refroidissement par eau.
- **1891** : FOREST réalise un moteur à quatre cylindres à soupapes commandées.
- **1892** : le premier brevet du moteur diésel.

- **1897** : première exposition d'automobile de 1897 à 1966, d'où l'évolution constante de la construction automobile amenant la modification du code de la route.

#### **I.4 Classification des véhicules automobiles**

On peut classer les véhicules automobiles suivant les trois caractéristiques suivantes (fig.1)

##### **I.4.1 L'utilisation du véhicule automobile**

- **Tourisme** : transport de voyageurs ;
- **Utilitaire** : transport de marchandises ou transport en commun ;
- **Légers** : ce sont les motocyclettes, les vélomoteurs, les bicyclettes, à moteur auxiliaires, les triporteurs ; ils comportent deux ou trois roues et n'ont pratiquement pas de carrosseries ;
- **Spéciaux** : carrosseries appropriées (citernes, benne, ambulance etc...).

##### **I.4.2 Position moteur et roues**

Si nous considérons non plus l'utilisation mais l'emplacement du moteur et celui des roues motrices, comme point de comparaison, nous proposons la comparaison secondaire suivante :

- Moteur avant propulsion arrière ;
- Moteur avant propulsion avant ;
- Moteur arrière propulsion arrière.

##### **I.4.3 Types de carrosseries (fig.1)**

- *Berline* : quatre portes, quatre glaces et quatre places ;
- *Coupé* : deux portes, deux glaces et deux places ;
- *Limousine* : quatre portes, six glaces ;
- *Sport* : pare-brise rabattable (décapotable) ;
- *Course*: forme aérodynamique ;
- *Coache* : deux portes, deux glaces et quatre places ;
- *Poids lourds*: camion à plateau, car autobus de 02 à 18 tonnes.

#### **I.5 Eléments d'automobile**

##### **I.5.1 Description (Fig.2)**

- *La carrosserie* : renferme les personnes ou les marchandises ;
- *Le moteur* : fournit de l'énergie mécanique ;
- *La transmission* : communiquent énergie aux roues motrices ;
- *Les roues* : prennent appui sur le sol, permettent aux véhicule de se déplacé ;
- *La suspension* : absorbe les chocs due aux inégalités de la route et transmis par les roues ;

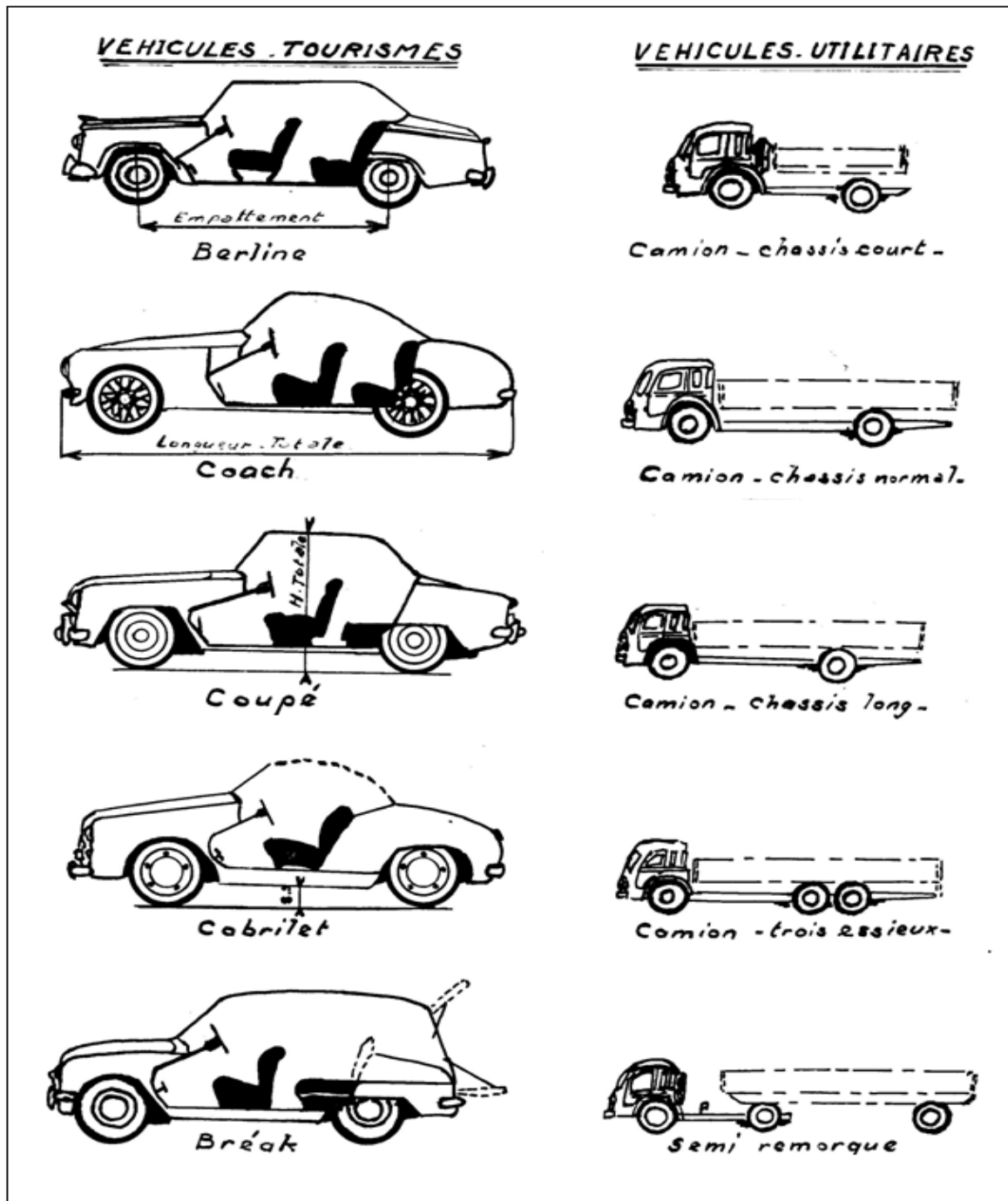


Figure 1: Types de carrosseries.

- L'ensemble de la direction : permet d'agir sur les roues ;
- Le système de freinage : son rôle est d'arrêter rapidement le véhicule;
- L'équipement électrique : indispensable pour le fonctionnement du moteur, l'éclairage et la commande de divers accessoires ;
- Châssis : constituant l'ossature du véhicule supporte, et assemble les différentes parties, à l'aide de boulons ou d'axes d'articulations, certains organes sont reliés entre eux par des silent blocs.

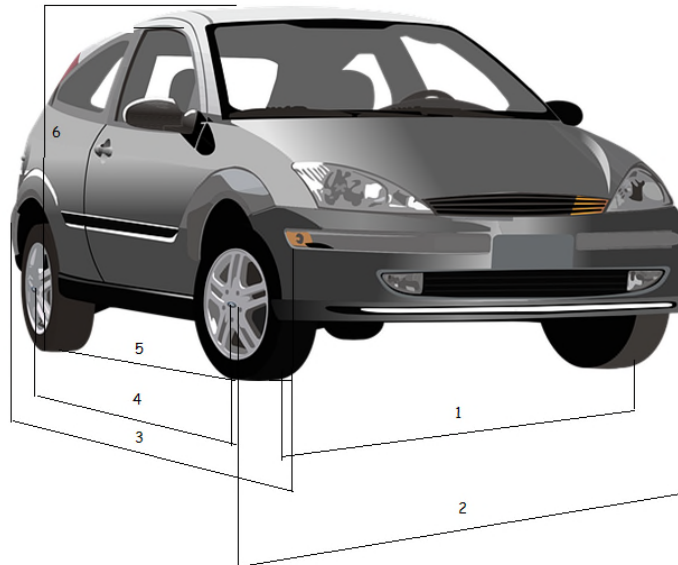


Fig.2 caractéristique dimensionnelle d'un véhicule

1. Voie ;
2. Largeur totale ;
3. Longueur totale ;
4. Empattement ;
5. Garde au sol ;
6. Hauteur totale.

### **I.5.2 CHASSIS**

Le châssis, appelé aussi bâti, ou cadre, est l'ossature qui supporte tous les organes du véhicule. Le châssis doit supporter également des efforts de flexion et de torsion.

#### **I.5.2.1 Qualités d'un châssis**

Le châssis en générale doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Rigidité ;
- Légèreté ;
- Résistance ;
- Permettre la fixation et l'accessibilité des divers organes.

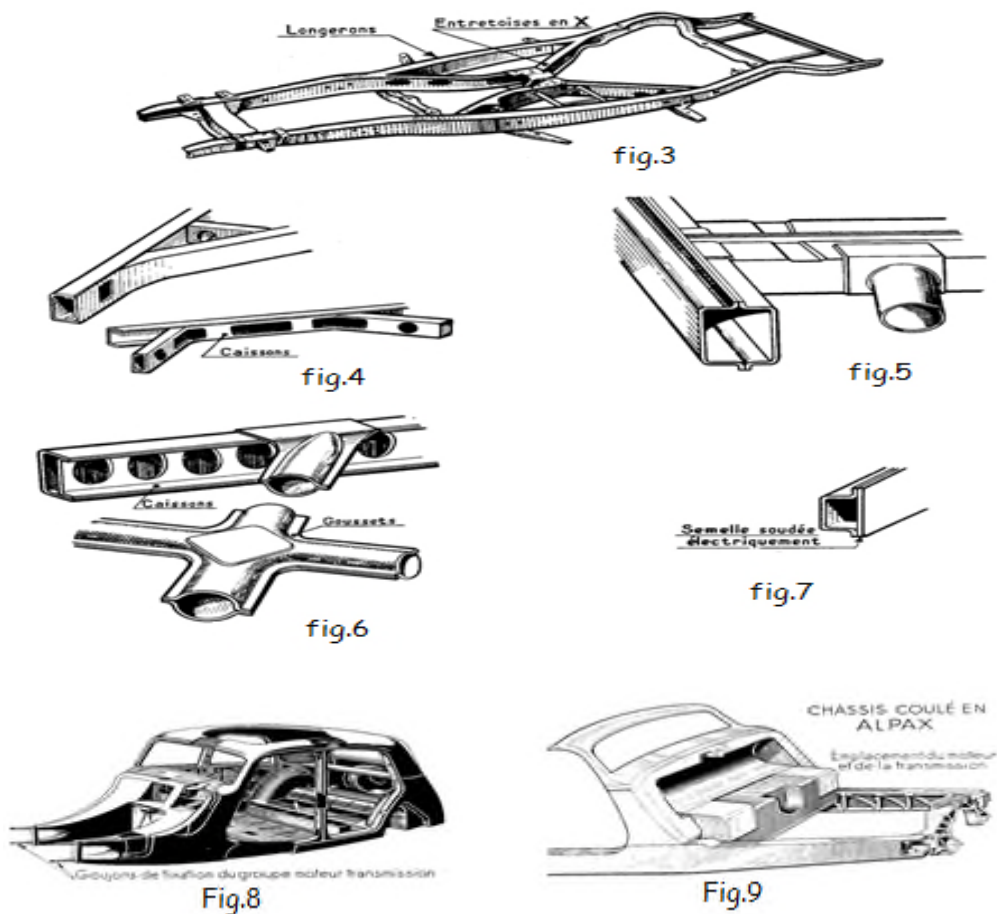
#### **I.5.2.2 Efforts supportés par un châssis**

La connaissance de ces efforts revêt une grande importance pour déterminer la forme des pièces aptes à les supporter. Le châssis travaille à la flexion sous l'effet des charges qui lui sont appliquées, à savoir: la carrosserie, le moteur, les passagers et la charge transportée: cette flexion s'exerce dans un plan vertical, surtout dans la partie médiane. Le châssis est, en outre, le siège de phénomènes de torsion lorsque les inégalités de la route imposent aux roues des positions telles que le parallélisme

des essieux est détruit: des efforts de torsion autour de l'axe longitudinal du véhicule sont alors transmis brutalement par la suspension.

Divers types de châssis

- a) **Châssis classique** (fig.3) : Deux longerons reliés par deux travers de section « U » ou en « I », la rigidité de l'ensemble est augmenté par des caissons ou des entretoises en « X » ou bien par des équerres ou goussets rivets (fig.4).
- b) **Châssis tubulaire** : même type que le châssis classique sauf que les éléments sont conçus par des tubes d'acier à section rectangulaire (fig.5), circulaire ou elliptique (fig.6). chaque élément est formé par deux coquilles de faible épaisseur. Tous les assemblages étant soudés électriquement (fig.7).
- c) **Châssis poutre**: poutre centrale tubulaire terminée à l'avant ou à l'arrière par une fourche, qui sert de barreau au moteur.
- d) **Châssis coque** (fig.8 et 9): la coque carrosserie est constituée d'éléments de grande surface, en tôle mince (épaisseur de 70 à 85 mm). Au point où une rigidité supérieure est nécessaire, la coque est renforcée par des traverses et des caissons soudés.



## II.1 Moteur d'automobile

### II.1.1 Définition

Le moteur est un groupe d'organes qui fournit l'énergie mécanique nécessaire à la marche d'un véhicule, on utilise la détente de gaz portés à haute pression et à haute température par la combustion d'un carburant dans l'air comprimé (fig. 1). Selon la matière dont le mélange combustible est réalisé, on distingue deux types de moteur :

- a. Moteurs à explosion : qui exige un carburateur ;
- b. Moteurs diesel : alimenté en combustible par injection.

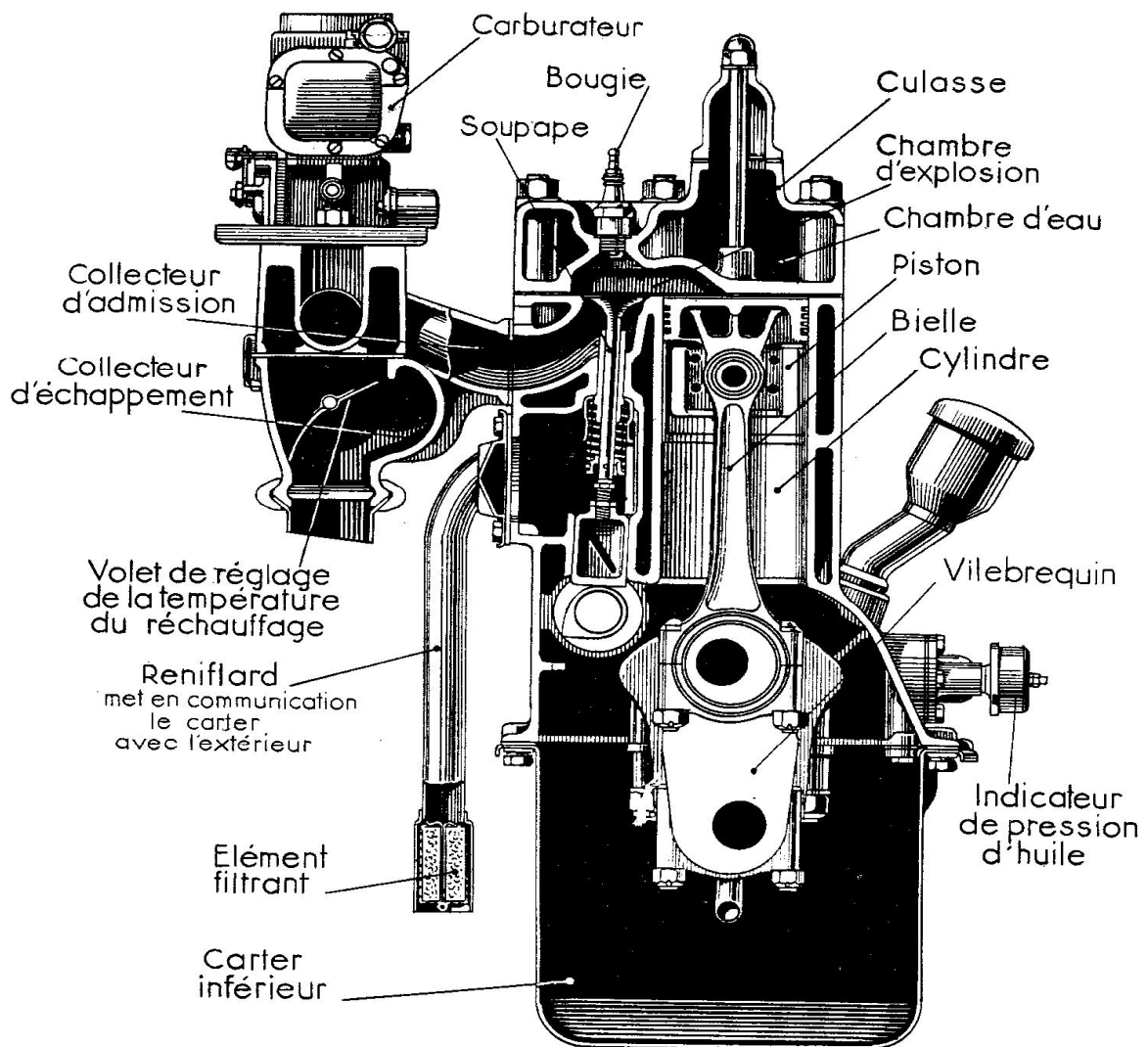


Fig. 1

## II.2 Classification des moteurs

L'évolution des gaz de combustible peut s'effectuer avec plus au moins de rapidité, ce qui conduit à une seconde classification :

- *Moteurs à deux temps* : ce type de moteur est caractérisé par une explosion en un tour de vilebrequin.

- *Moteurs à quatre temps* : dans ce type de moteurs l'explosion se fera en deux tours de vilebrequin.

On peut classer également les moteurs suivant la disposition des cylindres:

- Moteur à cylindres verticaux ;
- Moteur à cylindres en « V » d'un angle de 60° ou 90° ;
- Moteur à cylindres à plat ;
- Moteur à cylindres horizontal ;
- Moteur à cylindres en étoile.

Nous allons étudier tout d'abords le moteur à explosion à quatre temps, ainsi que les organes annexes qui peuvent se rencontrer sur d'autres types de moteurs.

### II.3 Étude du moteur à explosion monocylindrique à quatre temps (fig. 2)

Ce moteur équipe certaines motocyclettes et comprend :

- *un cylindre*, fermé à une extrémité, et dans lequel se déplace un piston;
- *un système bielle-manivelle* qui transforme le mouvement alternatif rectiligne du piston en un mouvement circulaire de l'arbre moteur;
- *un volant*, dispositif de régulation calé sur l'arbre moteur.

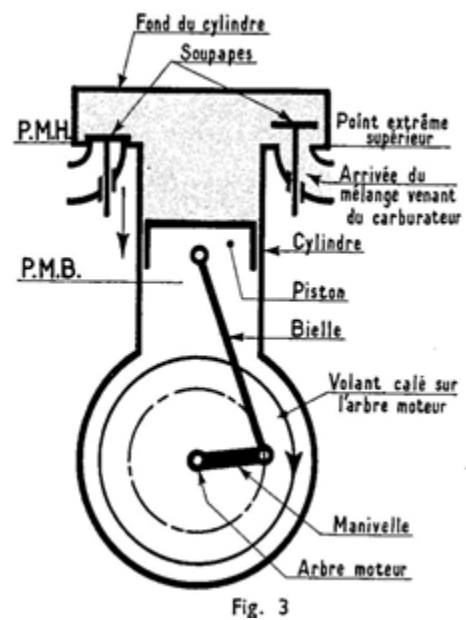
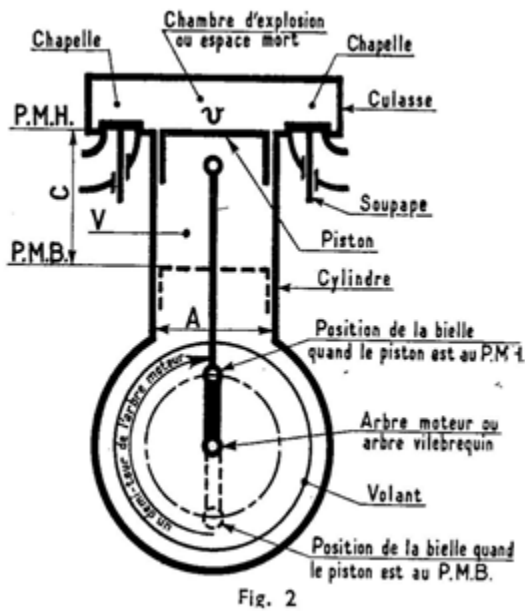
#### II.3.1 Principe de fonctionnement

Le mélange inflammable air + combustible est introduit dans le cylindre (fig. 3), puis comprimé par le piston (fig. 4). Quand celui-ci arrive en fin de course, en un point appelé point mort haut (PMH), le mélange comprimé est enflammé et brûle presque instantanément, comme un explosif. Les gaz, soumis à des températures et des pressions très élevées, repoussent brutalement le piston vers le bas (temps moteur) (fig. 5), jusqu'en un point appelé point mort bas (PMB), puis sont évacués, et le cycle recommence (fig. 6).

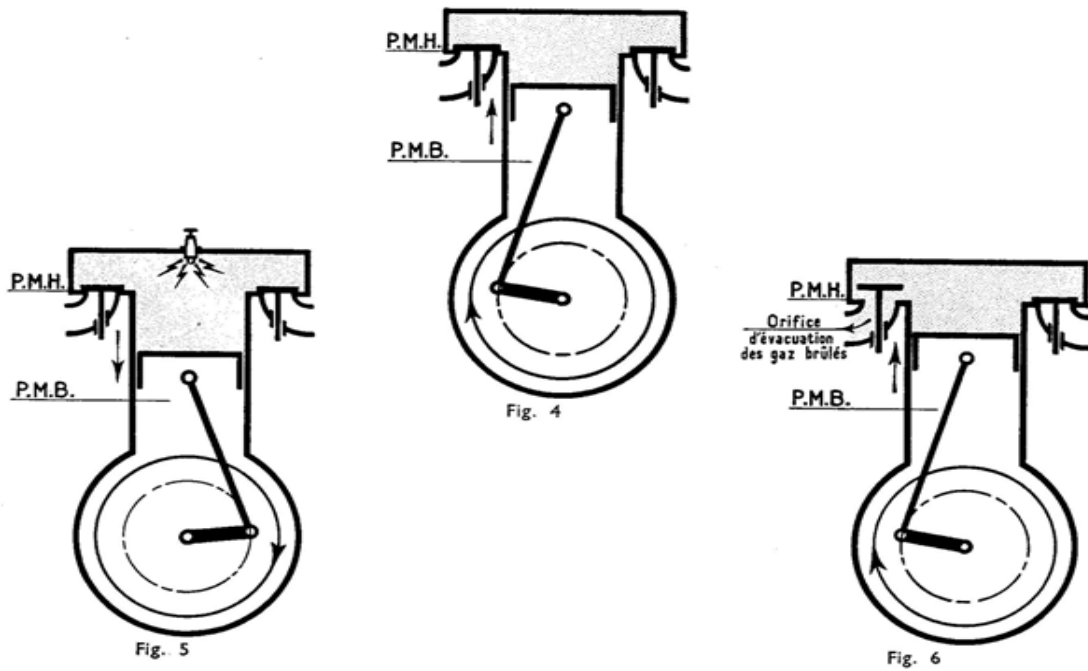
Dans le tableau ci-dessous en résume les différentes opérations des phénomènes ainsi que les organes qui interviennent.

| Opérations  | Organes  |
|---|--|
| <b>Préparation du mélange air plus combustible et transformation du mélange gazeux.</b> | carburateur  |
| <b>Admission du mélange dans le cylindre</b>  | Soupape d'admission, qui met en communication carburateur- cylindre        |
| <b>Compression du mélange pour accroître son homogénéité et élevé sa température.</b>   | pistons  |
| <b>Inflammation- allumage.</b>  | Etincelle électrique produite par rupture d'un courant (allumeur-magnéto). |

|  |  |
|--|--|
| Transformation du mouvement rectiligne-alternatif du piston en mouvement circulaire. | L'ensemble moteur : piston-bielle- arbre moteur                              |
| Uniformisation du mouvement de l'arbre moteur  | Volant calé sur l'arbre moteur (vilebrequin)                                 |
| Evacuation des gaz brulés  | Soupape d'échappement qui met en communication le cylindre avec l'extérieure |
| Ouverture et fermeture périodique des soupapes « ADM » et ECH »                      | Organes de distributions placées sous la dépendance de l'arbre moteur        |
| Graissage et refroidissement (condition indispensable de fonctionnement)             | Circuit de circulation : d'huile, d'eau ou d'air                             |







### II.3.2 Caractéristiques mécaniques d'un moteur

Comme caractéristique d'un moteur on peut citer :

- Alésage : diamètre (D) en mm ;
- Cylindre : diamètre intérieure (d) ;
- Course : « C » en mm (le déplacement du piston du PMH au PMB) ;
- Volume cylindrique « V en  $\text{cm}^3$  » ;
- Vitesse de rotation : « N, tr/min » ;
- PMH : point mort haut ;
- PMB : point mort bas.

### II.3.3 Fonctionnement du moteur à quatre temps

#### II.3.3.1 Définition

On appelle cycle l'ensemble des opérations qui se succèdent dans le moteur avant qu'il se retrouve dans les conditions initiales ; l'ordre des opérations est toujours le suivant (fig. 7) :

- admission du mélange carburé (air  $\pm$  carburant),
- compression des gaz frais,
- inflammation du mélange et détente,
- échappement des gaz brûlés.

Les déplacements du fluide s'effectuent naturellement si chacune de ces opérations correspond à une course complète du piston ; le cycle qui comporte quatre courses de piston est appelé cycle à quatre temps. Inventé par l'ingénieur français Beau de Rochas en 1862, il a été universellement adopté.

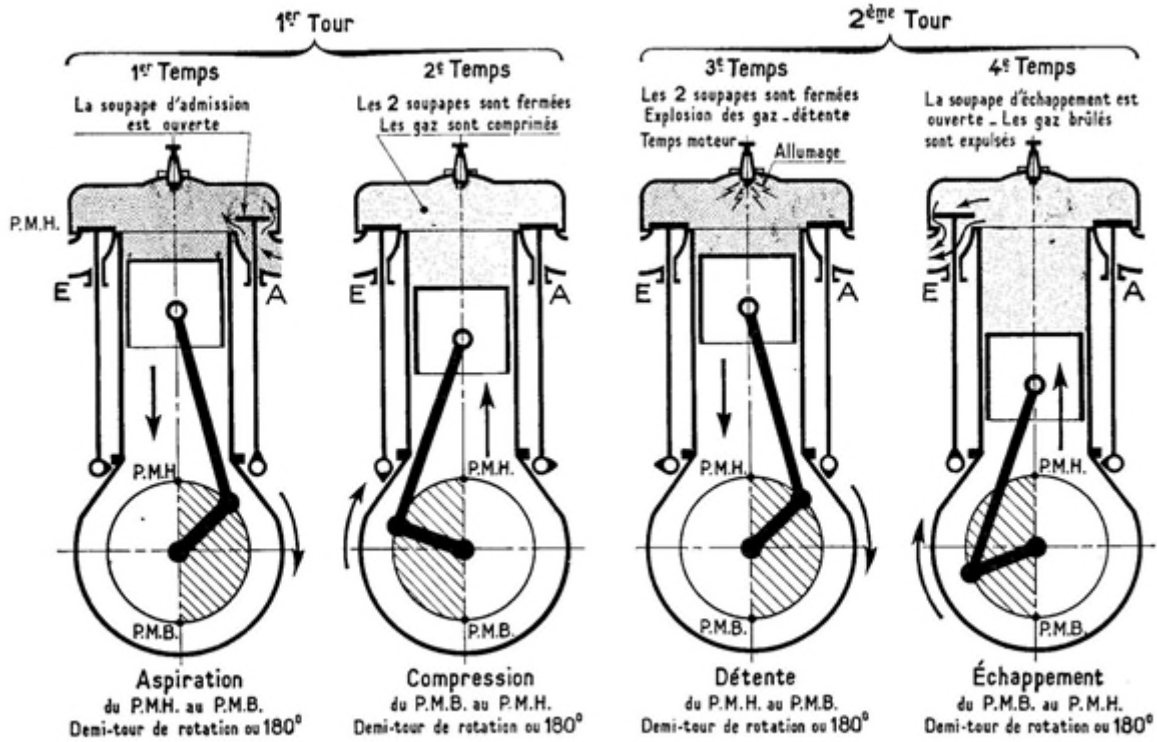


fig.7

### II.3.3.2 Étude du cycle à quatre temps

Chaque course de piston correspondant à un demi-tour de vilebrequin, ce dernier effectue deux tours pendant un cycle complet, mais il ne reçoit pas de l'énergie pendant toute la durée du cycle : seul le troisième temps (détente des gaz) est moteur ; les trois autres temps sont résistants. Cette particularité de fonctionnement entraîne deux conséquences importantes :

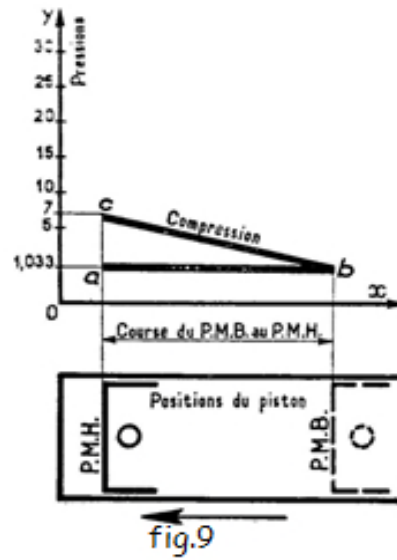
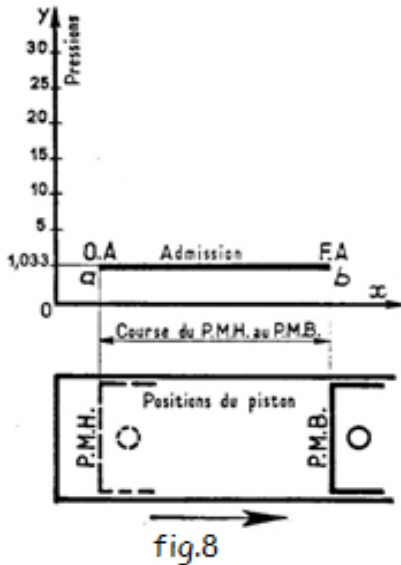
- au démarrage, le moteur est lancé pendant au moins un demi-tour afin de réaliser une compression dans le cylindre;
- en marche normale, le couple moteur est régularisé pour éviter que la transmission ne subisse un choc à chaque temps moteur; on dispose sur le vilebrequin un volant capable d'emmagasiner de l'énergie pendant le temps moteur, et de la restituer pendant les temps résistants.

### II.3.3.3 Diagramme théorique du cycle « beau de rochas »

Il est commode de représenter le cycle à quatre temps selon lequel évolue la masse gazeuse, à l'aide d'un graphique établi en coordonnées rectangulaires. On porte en abscisse le volume occupé par les gaz et en ordonnée la pression correspondante. Nous simplifierons le diagramme en admettant que l'explosion est instantanée, que les soupapes s'ouvrent quand le piston est exactement au point mort, et que la pression atmosphérique règne dans le cylindre pendant toute la période d'ouverture des soupapes. Au cours d'un cycle on a successivement :

**a. Admission (fig. 7 et 8)**

La soupape d'admission s'ouvre : le piston partant du PMH descend jusqu'au PMB, le mélange gazeux combustible est aspiré et vient remplir le cylindre. Comme ce dernier est en communication avec l'extérieur on suppose que l'opération se déroule à la pression atmosphérique (1 kg/cm<sup>2</sup> environ). Dans ces conditions, la représentation graphique obtenue est une droite horizontale parallèle à l'axe des abscisses, dont l'ordonnée est égale à la pression d'admission et de longueur égale à la course du piston.

**b. Compression (fig. 7 et 9)**

La soupape d'admission se ferme: le cylindre est alors complètement clos, et le piston, remontant du PMB au PMH comprime les gaz jusqu'à une pression absolue avoisinant 7 kg/cm<sup>2</sup> si le taux de compression vaut environ 5, on obtient une courbe « bc », rapidement croissante vers c.

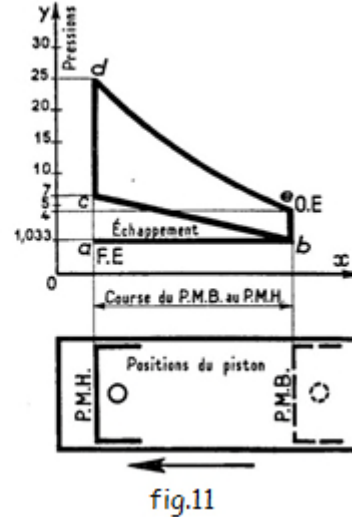
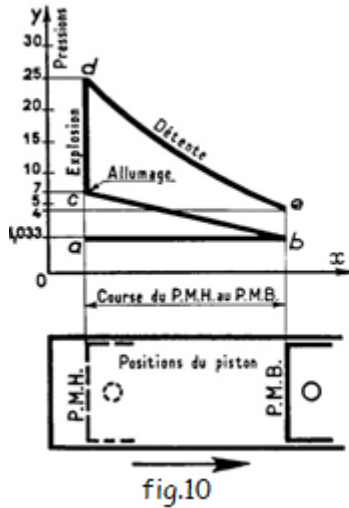
**c. Explosion et détente (fig. 7 et 10)**

Le piston étant au PMH, on provoque une étincelle dans le mélange et l'explosion se produit. La pression augmente brusquement de c en d, par exemple de 7 à 25 kg/cm<sup>2</sup>. La représentation graphique de cette variation de pression à volume constant est une droite parallèle à l'axe des ordonnées et d'abscisse égale à y, volume de la chambre de combustion. A ce moment commence la détente par suite du mouvement du piston vers le bas; elle se poursuit jusqu'à ce que celui-ci atteigne le PMB; les gaz sont encore à une pression supérieure à la pression atmosphérique, environ 4 kg/cm<sup>2</sup>. La détente est figurée par la courbe « d e ».

**d. Echappement (fig. 7 et 11)**

Lorsque le piston est au PMB, la soupape d'échappement s'ouvre. Les gaz commencent à s'écouler vers l'extérieur, et la pression dans le cylindre s'égalise à la pression atmosphérique. On obtient

sur le graphique la droite « e b » parallèle à l'axe des ordonnées. Le piston remonte du PMB au PMH en expulsant les gaz brûlés restant dans le cylindre : on parcourt sur le graphique la droite initiale « a b », mais en sens inverse.



Ce diagramme permet de calculer le travail théorique fourni par les gaz; on sait, en effet, que le travail d'une force constante est égal au produit de la force par le déplacement. Dans ce cas la force sur le piston varie au cours du déplacement et la formule du travail est inapplicable, mais en considérant l'aire comprise entre la courbe, l'axe des abscisses, et les verticales des points b et c, on obtient :

$$W_m = \text{aire } a d e b \quad (\text{fig. 4})$$

$$W_r = \text{aire } a c b a \quad (\text{fig. 4})$$

$$W_u = \text{aire } d e b c \quad (\text{fig.4})$$

### II.3.3.4 Étude du cycle réel (fig. 12)

Les hypothèses formulées initialement ne sont pas réalisées en pratique. L'équilibre des pressions entre l'atmosphère et l'intérieur du cylindre à l'admission et à l'échappement n'est pas rigoureux, car l'ouverture et la fermeture des soupapes ne sont pas instantanées et les fluides mettent du temps à s'écouler. L'explosion, elle aussi, demande un certain délai : pour un moteur tournant à 3000 tour par minute (50 tours par seconde), une explosion durant 1/300 de seconde correspond à une rotation de vilebrequin valant 600. Le cycle théorique est alors modifié.

Les différentes opérations s'effectuent avec une avance ou un retard que l'on mesure par rapport aux points morts correspondants, soit par l'angle du coude de vilebrequin, soit par la distance du piston. Les constructeurs utilisent indifféremment les valeurs angulaires ou les valeurs linéaires pour caractériser le réglage d'un moteur.

### a. 1<sup>er</sup> temps : admission

La durée théorique d'admission est trop courte pour que le remplissage soit correct, compte tenu de l'ouverture et de la fermeture de la soupape. La colonne de gaz frais qui circule dans la tubulure d'admission à grande vitesse moyenne (10 à 20 m/s), et dont le débit est intermittent mais s'effectue à des vitesses beaucoup plus élevées (40 à 80 m/s), serait le siège de tourbillons excessifs au passage de la soupape.

*Avance à l'ouverture de la soupape d'admission* : AOA = 50 environ.

Cette avance tient compte du temps nécessaire à la levée de la soupape; l'ouverture est totale dès l'instant où la dépression commence à se faire sentir; il y a peu de risques pour que les gaz brûlés soient refoulés vers l'admission, car les gaz frais, par inertie, se mettent en pression contre la soupape d'admission au cours des trois temps précédents.

*Retard à la fermeture de la soupape d'admission* : RFA = 30 à 400.

Au PMB la dépression se fait encore sentir et les gaz, aspirés à grande vitesse, continuent à affluer à l'intérieur du cylindre. Il y a donc intérêt à retarder la fermeture de la soupape d'admission et à laisser passer les gaz pendant une fraction de la course ascendante du piston. Pendant la course d'admission le cylindre reste en dépression, ce qui se traduit sur le diagramme la ligne « a b » (fig. 12).

Le taux de remplissage, rapport entre le poids du gaz admis effectivement et le poids est de l'ordre de 0,9; il peut s'abaisser à 0,6 aux grandes vitesses de rotation.

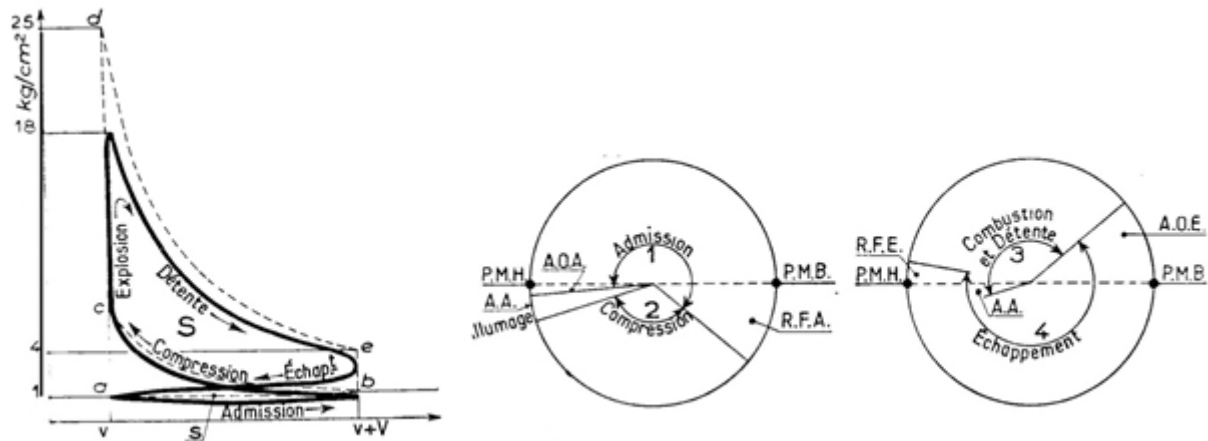


fig.12

### b. 2<sup>ème</sup> temps: compression

La courbe de compression « b c » (fig. 6) est tout entière au-dessous de la courbe théorique puisqu'on part d'une pression plus basse.

### c. 3<sup>ème</sup> temps : explosion et détente Avance à l'allumage : AA= 10 à 30°.

Cette avance tient compte de la durée qui s'écoule entre le déclenchement du système d'allumage et l'apparition de l'étincelle, et surtout de la durée de la combustion (1/4 à 1/5 de tour de vilebrequin). En étalant la combustion de part et d'autre du PMH on peut profiter davantage de la haute pression

des gaz brûlés. La remontée du piston se trouve contrariée mais, outre que les plus hautes pressions ne sont pas atteintes avant le PMH, l'inertie du piston évite que l'embellage ne subisse un choc violent (cliquetis). Cette description sommaire suffit à expliquer la différence notable entre le diagramme théorique et le diagramme réel qui est fortement arrondi au PMH.

#### d. 4<sup>ème</sup> temps : échappement

L'échappement n'est jamais complet car les gaz brûlés contenus dans l'espace mort ne peuvent pas être éliminés; on évite simplement que ces gaz résiduels soient encore sous une pression élevée à la fin de l'échappement, afin que leur masse reste voisine du minimum.

- *Avance à l'ouverture de la soupape d'échappement :  $AOE = 35$  à  $45^\circ$ .*

Cette avance permet à la soupape d'échappement de présenter l'orifice de passage maximum aux gaz brûlés avant que le PMB ne soit atteint et, surtout, la chute de pression dans le cylindre est fort avancée lorsque le piston commence à remonter; la résistance des gaz brûlés à son déplacement se trouve diminuée, leur détente est presque totale lorsque le piston atteint le PMH.

La courbe e a du diagramme réel se trouve tout entière au-dessus de la droite théorique.

- *Retard à la fermeture de la soupape d'échappement :  $RFE = 100$  environ.*

Il n'y a aucun inconvénient à laisser la soupape d'échappement ouverte alors que la soupape d'admission est déjà soulevée. Le piston n'a pas effectué de descente notable, la vitesse de sortie des gaz brûlés est suffisante pour qu'ils continuent à s'échapper, par simple inertie.

#### II.3.3.5 Diagramme pratique

Le tracé du diagramme pratique est très difficile car la grande vitesse de rotation des moteurs actuels s'oppose à l'emploi des manomètres courants pour la mesure des pressions, en raison de l'inertie de ces appareils. Les dispositifs électriques n'ont pas cet inconvénient : l'indicateur photo cathodique de Labarthe est souvent utilisée car il permet l'obtention rapide d'un diagramme continu (fig. 12). Le diagramme comporte deux boucles d'aires inégales « S » et « s » décrites en sens inverses par le point figuratif de l'état de fluide; on démontre que le travail effectué par les gaz est égal à la différence des surfaces S et s:

$$T = S - s \quad (1)$$

Le réglage d'un moteur a pour objet de rendre la différence « S — s » maxima à l'allure de régime adoptée; les conditions de fonctionnement optimum sont enregistrées sur une épure de distribution (fig. 6) où le déclenchement des organes est indiqué par un angle ou par une distance au point mort correspondant. Le mécanicien vérifie la correction du réglage en utilisant les repères placés sur le volant du moteur par le constructeur ou des tiges graduées introduites par le haut du cylindre jusqu'au contact du piston.

### II.3.3.6 Amélioration du rendement d'un cycle à quatre temps

La thermodynamique permet d'étudier les conditions dans lesquelles une masse donnée d'un mélange carburé peut produire du travail mécanique; il apparaît que l'énergie utilisable croît avec le taux de compression (fig.13).

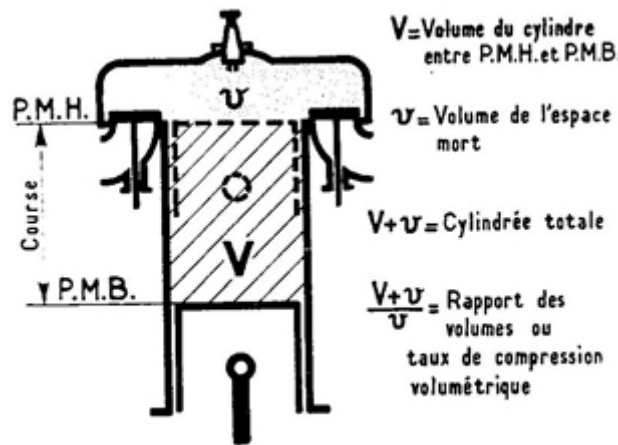


fig.13

Le constructeur a donc intérêt à réduire l'espace mort «  $v$  » pour accroître la compression, mais on ne peut pas dépasser impunément certaines valeurs limites car la température des gaz s'élève rapidement; le tableau suivant indique les pressions et les températures de la même masse gazeuse soumise à des taux de compression allant en croissant.

| Taux de compression | Température °C | Pression (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|----------------|--------------------------------|
| 5                   | 280            | 7                              |
| 7                   | 305            | 10.5                           |
| 10                  | 350            | 16                             |

Comme le mélange air-essence s'enflamme spontanément lorsque sa température dépasse 330 °C, environ, un taux de compression excessif pourrait entraîner l'auto-allumage. L'élévation de température due à la compression étant sensiblement uniforme dans toute la masse gazeuse, l'explosion qui commence partout à la fois, est beaucoup plus violente que celle amorcée en un seul point par l'allumage ordinaire. Un moteur peut fonctionner avec sécurité à condition d'éliminer le risque de voir la combustion achevée avant que le piston ait atteint le PMH. En conséquence, les constructeurs adoptent pour les moteurs courants des taux de compression variant de 5 à 7. Ces valeurs ne sont dépassées que pour certains moteurs spéciaux, "destinés principalement aux voitures de course; la température d'auto-allumage du mélange air-combustible est relevée aux environs de 400° par l'addition d'un produit antidétonant.

## II.4 Moteur monocylindrique

Présente deux inconvénients qui le rendent inapte à un service satisfaisant :

- le couple disponible sur le vilebrequin est irrégulier (le cycle comporte un temps moteur sur quatre), et il est nécessaire de disposer un volant d'un poids relativement important afin d'éviter les à-coups dangereux pour la transmission ;
- les dimensions auxquelles on est conduit pour obtenir une puissance suffisante sont excessives.

On remédie à ces inconvénients en juxtaposant plusieurs ensembles monocylindriques identiques dont les bielles commandent le même vilebrequin ; le tout, disposé en un bloc compact, constitue un moteur multi cylindrique. Les cylindres sont le siège de cycles identiques mais décalés dans le temps pour que les temps moteurs s'échelonnent régulièrement; le volant est ramené à des proportions très réduites.

Les moteurs à grande puissance sont constitués de pièces nombreuses, certes, mais de dimensions modérées, fabriquées en grande série donc meilleur marché. Pour usiner commodément les cylindres et les sièges des soupapes, pour démonter facilement les organes mobiles, le bâti du moteur est décomposé en trois parties principales (fig. 1).

- le bloc cylindre supporte, directement ou non, les parois latérales des cylindres;
- la culasse, disposée à la partie supérieure, obture-les cylindres;
- carter, placé à la partie inférieure, sert de réservoir pour l'huile de graissage. pour éviter les fuites d'huile, un joint de carter est utilisé.

### II.4.1 Fonction du bloc cylindre

Le bloc-cylindres doit remplir plusieurs fonctions:

- résisté à la pression des gaz de l'explosion qui tendent à le dilater et à repousser la culasse ;
- guider le piston, d'où la nécessité de diminuer le frottement et d'augmenter la résistance à l'usure tout en permettant un usinage et un polissage faciles;
- évacuer la chaleur grâce à la conductibilité des parois;
- éventuellement, contenir l'eau de refroidissement tout en résistant à la corrosion qu'elle est susceptible de provoquer et qui peut, à la longue, gêner la circulation dans les chambres de refroidissement;
- supporter les organes de distribution.



### II.4.2 Différents types de parois des cylindres

a. **Type (A)** : Le bloc-cylindres ne comporte qu'une seule pièce, entièrement creuse, l'espace intérieur constituant les chemises d'eau ou chambres d'eau (fig.14). Les surfaces de frottement sont alésées directement dans le bloc-cylindres qui présente les plans d'appui de la culasse et du carter sur les faces supérieures et inférieures. La complexité des formes impose le choix d'un matériau facile à mouler, on utilise une fonte alliée, de dureté supérieure et résistant bien à l'extension ; facile à usiner, doté d'un bon coefficient de frottement, ce matériau possède une faible conductibilité et se corrode rapidement.

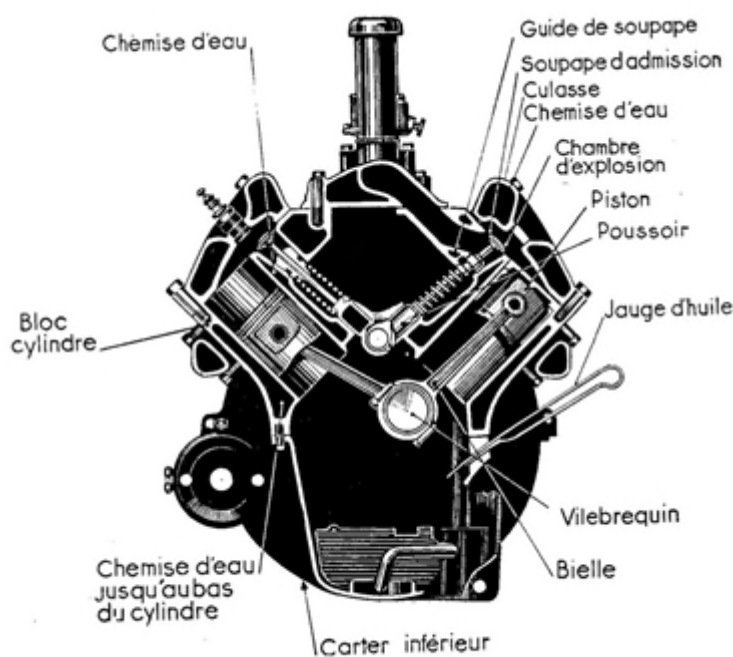


fig.14

b. **Type (B)** : L'alésage des cylindres et le reste des surfaces jouent des rôles nettement différents, aussi est-il normal de concevoir le bloc-cylindres en plusieurs parties distinctes. Des pièces, analogues à des éléments de tuyau, appelées fûts, sont rapportées dans des alésages du bloc-cylindres proprement dit. Les fûts sont en contact intérieurement avec les pistons et les gaz chauds, extérieurement avec l'eau de refroidissement d'où leur nom de chemises humides (fig. 15). Cette disposition présente plusieurs avantages :

- le bloc-cylindres est plus facile à mouler car il est dépourvu de parties à double-paroi ;
- la fonte spéciale est réservée aux fûts seulement, le reste du bloc étant en fonte ordinaire, ou en alliage d'aluminium plus léger et meilleur conducteur de la chaleur ;
- le remplacement du cylindre après une usure excessive ou une avarie n'entraîne pas de frais considérables.

Parmi les inconvénients de cette disposition est le problème d'étanchéité, la fuite d'eau dans le carter ou dans la cylindrée. La chemise

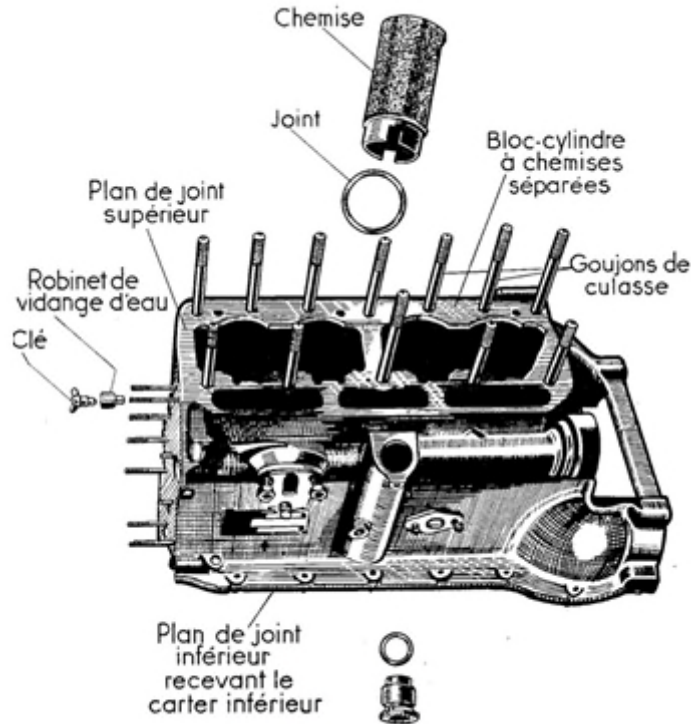


fig.15

c. **Type(C)** : le guidage du piston est assuré par la chemise qui ne peut assurer une résistance suffisante en raison de sa faible épaisseur. Cette pièce doit donc être guidée sur tout sa longueur, soit directement dans un alésage du bloc cylindre, soit à l'intérieure d'un fut rapporté dans ce dernier ; entièrement soustraite au contact de l'eau de refroidissement, cette chemise particulière prend le nom de chemise sèche (fig.16). Dans les moteurs anciennes, les chemises ont été fabriqué en fonte spéciale, centrifugées, sont emmanchées à force ou bien introduites librement après avoir contractées par immersion dans l'azote liquide à  $-195^{\circ}\text{C}$ . A température normale, serrent dans les cylindres ce qui rend leurs démontages difficiles. A l'heur actuel, les chemises sont fabriquées en tôle d'acier laminée avec précision, et roulée en forme de cylindre de révolutions, le serrage assure le contact des bords et une étanchéité parfaite.

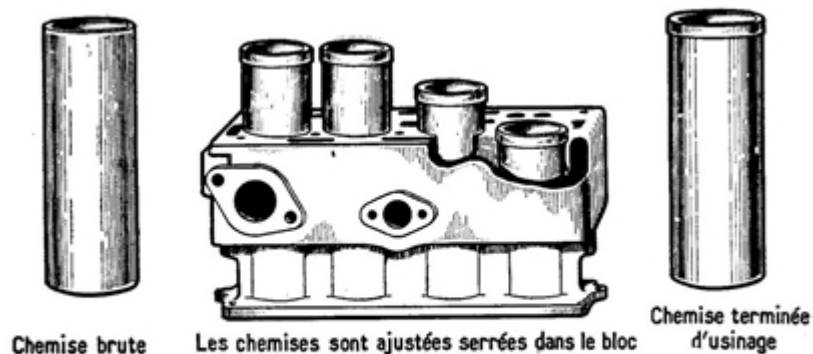


fig.16

### II.4.3 Organes de distributions

L'aspect extérieur d'un moteur à combustion interne est peu influencé par la présence d'un chemisage ou par sa nature ; la disposition des soupapes, au contraire, détermine en partie la forme générale du bloc-cylindres. Le tableau ci-dessus indiqué, pour chaque type de distribution, allure de la section du bloc-cylindres par un plan perpendiculaire à l'axe du vilebrequin.

|  |  |
|--|--|
| Moteur à soupapes latérales<br>(Soupapes commandées directement par l'arbre à cames) | Bloc-cylindres en :<br>« T » (fig.17), « L » (fig.18) et<br>« V » (fig.19) |
| Moteur à soupapes en tête (soupapes au-dessus du cylindre commandées par culbuteur). | Bloc-cylindres en :<br>« I » (fig.20)<br>« V »                             |
| Moteur sans soupapes   | Bloc-cylindres en :<br>« I »   |

### II.4.4 Disposition des axes des cylindres

Un moteur multicylindres est surtout caractérisé par la méthode adoptée pour regrouper les cylindres en vue d'obtenir un bâti de moteur de forme simple et d'encombrement réduit. Les dispositions les plus fréquentes sont les suivantes :

#### II.4.4.1 Moteur en ligne

Les axes des cylindres sont verticaux et situés dans le même plan. C'est le montage le plus courant, car le bloc conserve une forme simple quel que soit le nombre de cylindres ; néanmoins ce dispositif est encombrant en hauteur et en longueur ; le vilebrequin devient, en outre, de plus en plus compliqué à mesure que le nombre de cylindres augmente car il faut lui ménager des portes intermédiaires fig.21

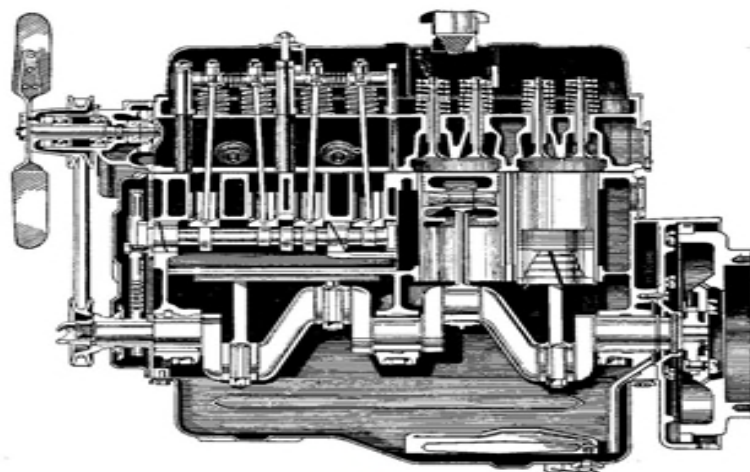
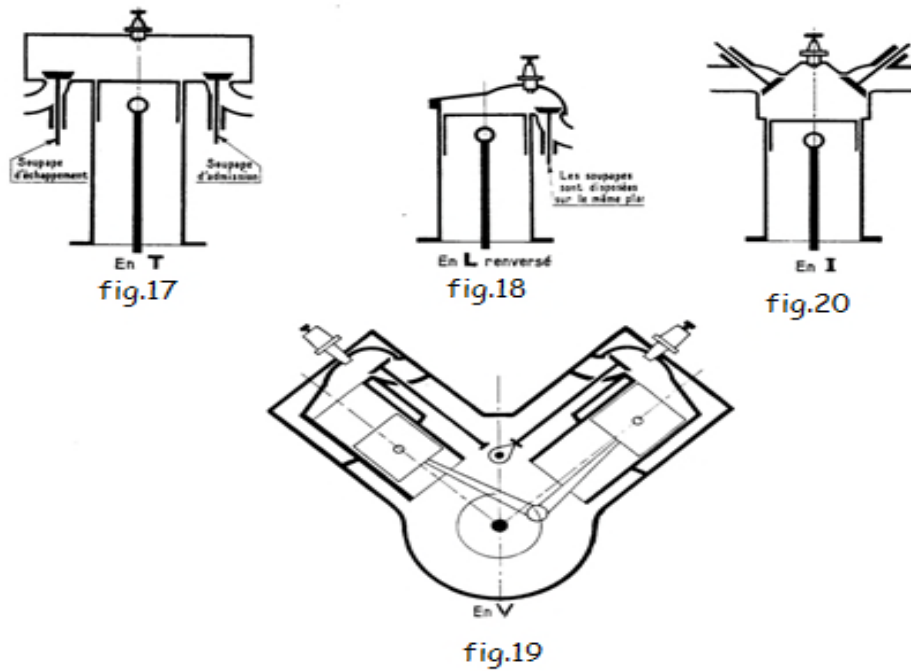


fig.21

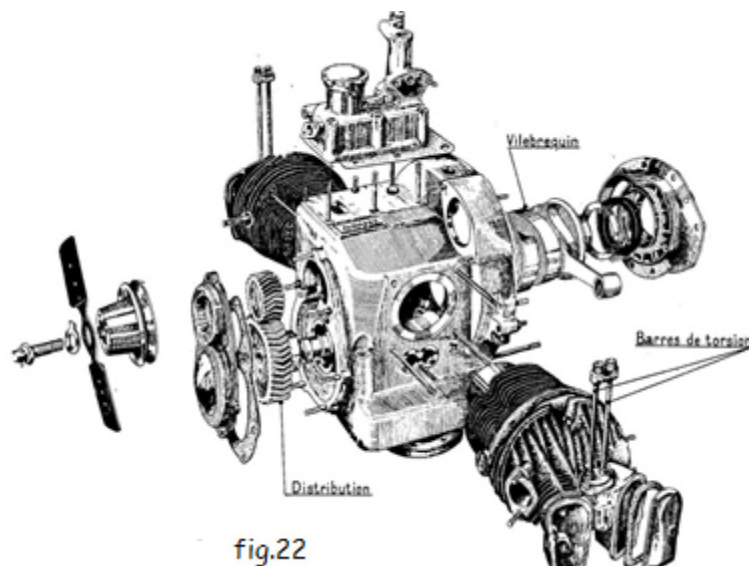


#### II.4.4.2 Moteur en « V »

Les cylindres sont répartis en deux séries et dans chacune d'elle les axes sont parallèles et situés dans un même plan. L'angle des deux plans varie de  $60^\circ$  à  $90^\circ$ . L'encombrement dans de ce type est réduit par rapport au type en ligne.

#### II.4.4.3 Moteur à plat

Dans le but de réduire simultanément la longueur et la hauteur du moteur, et pour faciliter le refroidissement en dispersant le plus possible les différents cylindres, les constructeur ont imaginé de placer les cylindre horizontalement et opposés deux à deux ; on obtenant un moteur en « V » dont l'angle vaut  $180^\circ$ . Ce montage convient pour les moteurs à quatre cylindres et à deux cylindres ; le refroidissement par l'air devient suffisant (fig.22).



## II.5 culasse

### II.5.1 Rôle

La culasse possède plusieurs rôles :

- obture le cylindre et constitue la chambre de combustion, c'est-à-dire l'espace correspondant au volume qui subsiste quand le piston est au point mort haut ;
- reçoit le dispositif d'allumage et, dans les moteurs à soupapes en tête, qui sont la majorité, elle porte les orifices d'entrée et de sortie des gaz ainsi que les organes de distribution.
- évacue la chaleur dégagée par la combustion des gaz.

### II.5.2 Constitution de la culasse

Ces différentes fonctions entraînent des formes compliquées : une double paroi, venue de fonderie, permet la circulation de l'eau, chargée d'évacuer la chaleur; lorsqu'on a prévu le refroidissement par air, des ailettes garnissent la surface extérieure (fig. 10, chap. V).

La culasse porte les sièges des soupapes, les tubulures de passage des gaz frais et brûlés, le logement des guides de soupapes et enfin les trous taraudés pour le montage des bougies d'allumage (fig. 23).

Les matériaux qui conviennent le mieux sont la fonte et l'aluminium. Tous deux se prêtent bien au moulage, et l'aluminium possède en outre une excellente conductibilité, assurant ainsi un bon refroidissement et évitant une élévation de la température (en particulier du siège de la soupape d'échappement) qui risquerait de provoquer l'auto-allumage.

### II.5.3 Assemblage de la culasse au bloc-cylindres

Cet assemblage doit être :

Rigide, pour résister à la fois aux chocs répétés des explosions dans la chambre de combustion et aux dilatations provoquées par les variations de température entre l'arrêt et la marche de régime étanche, pour éviter toute fuite de gaz vers l'extérieur et ce qui est beaucoup plus important, tout rentrée d'eau dans les cylindres.

La surface d'assemblage est plane afin de pouvoir utiliser un joint ; cet organe réunit les qualités suivantes :

Incorrodabilité, à l'action des gaz brûlés et de l'eau de refroidissement,

Résistance, aux températures atteintes par la culasse le long de la chambre de combustion ( $400^{\circ}$ ),

Malléabilité, afin d'épouser les surfaces d'assemblage.

On choisit un joint métalloplastique, constitué par une plaque d'amiante, serrée entre deux feuille très minces de cuivre ou d'aluminium, ou, à défaut, d'acier. Le serrage de la culasse sur le bloc-cylindres s'effectue à l'aide de goujons, disposés en nombre suffisant et assez près l'un de l'autre pour assurer aussi uniformément que possible, la portée des deux surfaces sur le joint.

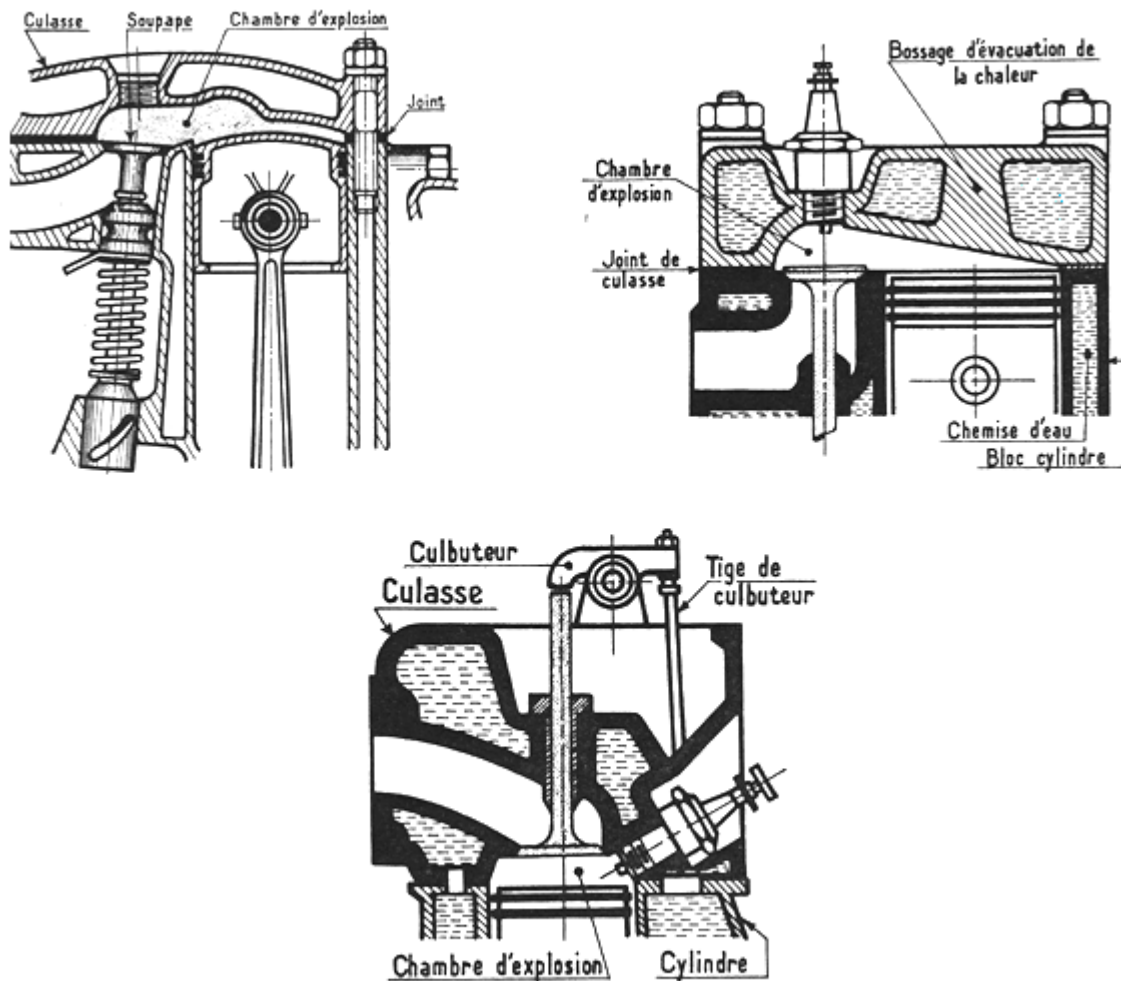


fig.23

## Piston, la bielle, le vilebrequin, le volant moteur

### II.6 PISTON

#### II.6.1 Rôle

Le piston permet l'échange d'énergie entre les gaz et l'embellage. Pendant la détente, les gaz fournissent de l'énergie au piston, mais au cours des autres temps du cycle, c'est la bielle qui commande le mouvement du piston. Dans le cylindre, le piston est animé d'un mouvement rectiligne alternatif; le jeu de fonctionnement, qui serait une source possible de fuites, appelle l'emploi d'un dispositif d'étanchéité.

#### II.6.1.2 Efforts supportés par le piston (fig. 24)

La poussée des gaz détermine un effort important, dirigé selon l'axe : par exemple, sur un piston de diamètre égal à 85 mm, les gaz sous la pression de  $16 \text{ kg/cm}^2$  exercent des actions ayant pour résultante :

$$16 \times \frac{3.14 \times 8.5^2}{4} = 907 \text{ kg}$$

L'action de la bielle est dirigée sensiblement selon l'axe du corps de bielle.

L'action du cylindre a deux composantes :

- une action normale au piston, dirigée perpendiculairement à l'axe du vilebrequin, et due à l'obliquité de la bielle;
- une action tangentielle au piston associée à la force précédente en raison du frottement, et qui absorbe de l'énergie.

L'usure des surfaces n'est pas régulière, elle se localise où s'exercent les actions de contact: cylindre et piston s'ovalisent. Les forces d'inertie, alternatives, dues aux variations de la vitesse du piston au cours du cycle, et particulièrement élevées aux points morts. Ces actions sont proportionnelles à la masse du piston et au carré de la vitesse du vilebrequin.

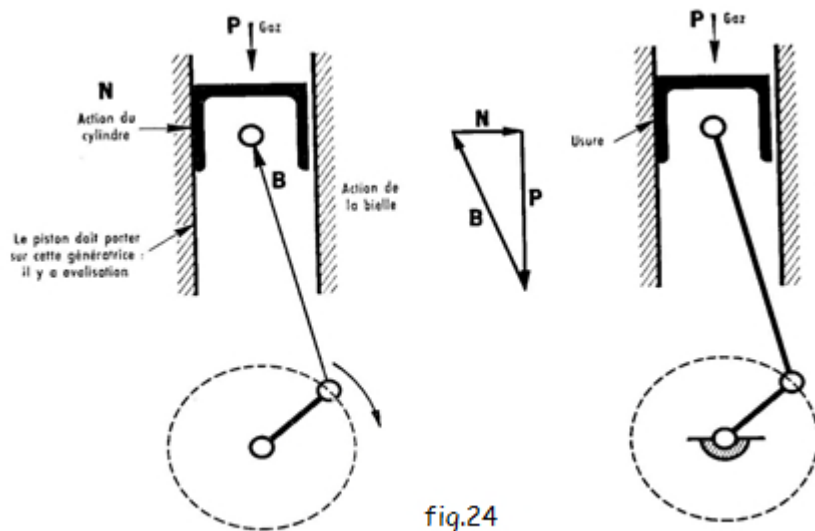


fig.24

### II.6.1.3 Constitution d'un piston (fig. 25)

Il affecte la forme d'un dé, ouvert du côté du carter, et comporte deux parties nettement distinctes :

- la partie supérieure, ou culot, reçoit l'action des gaz et assure l'étanchéité; le fond est en général plan, parfois bombé (convexe ou concave, selon la forme que l'on recherche pour la chambre de combustion). Un jeu important est réservé entre le cylindre et la paroi latérale du culot qui ne doivent pas entrer en contact, même après dilatation. Des gorges circulaires à section carrée portent des segments d'étanchéité;
- la partie inférieure, ou jupe, assure le guidage rectiligne. Elle porte, à l'intérieur, des bossages qui transmettent la poussée du culot à l'axe d'articulation du pied de bielle.



Le matériau du piston doit répondre à de nombreuses exigences; on le choisit : moulable en raison de la complexité des formes, doté d'un bon frottement avec le matériau du cylindre, bon conducteur de la chaleur afin que le culot demeure à une température modérée et que le risque d'auto-allumage soit écarté, et léger, ce qui réduit l'importance des forces d'inertie. Les moteurs actuels sont rapides, aussi les deux dernières exigences sont prépondérantes et font abandonner la fonte au profit des alliages légers à base d'aluminium ou de magnésium.

#### II.6.1.4 Types de piston

Le métal qui constitue le piston se dilate plus que le cylindre parce que son coefficient de dilatation est supérieur (le double de celui de la fonte pour un alliage d'aluminium, de cuivre, de nickel et de silicium, fréquemment employé) et que la température du piston, refroidi surtout par l'air du carter, demeure plus élevée que celle du cylindre, refroidi en général par de l'eau. Aussi doit-on apporter un soin particulier à l'établissement de la jupe afin qu'elle assure un guidage correct au départ du moteur comme en marche de régime; un piston ajusté pour la marche courante serait trop petit à froid, aurait tendance à basculer, et fonctionnerait bruyamment ; inversement, un piston bien ajusté à froid, serrerait en marche normale.

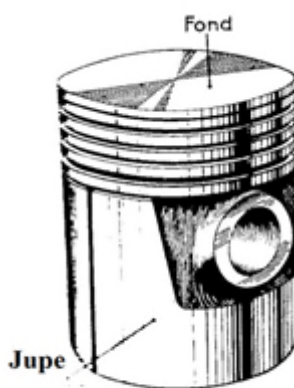


fig.25

La jupe est fendue sur toute sa hauteur, ce qui permet sa dilatation sans serrage contre le cylindre; la fente n'est pas dirigée selon une génératrice, mais selon une hélice afin d'éviter la formation d'un bourrelet d'usure, et de rayures contre le cylindre. On distingue les pistons :

- à jupe ovalisée dont la dilatation, s'effectuant suivant le plus petit diamètre, tend, à chaud, à redonner à la jupe une forme cylindrique;
- à jupe indépendante reliée au culot par deux barrettes en métal « invar », c'est-à-dire en un acier spécial au nickel à faible coefficient de dilatation (fig. 26);



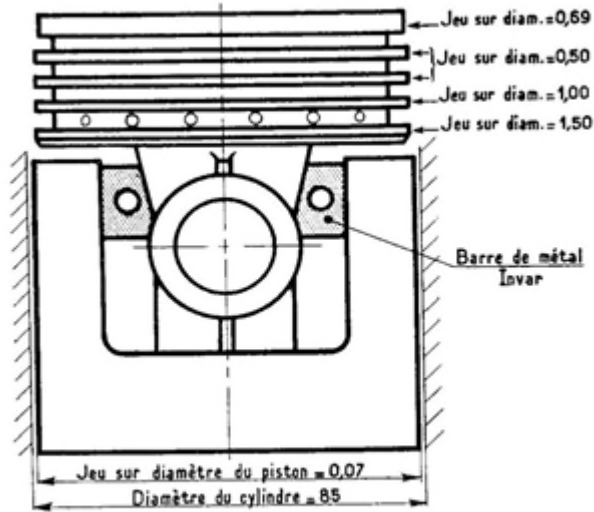


fig.26

- à jupe thermostatique : deux anneaux d'acier, intérieurs à la jupe, lui permettent de conserver sa courbure (fig. 27 et 28).

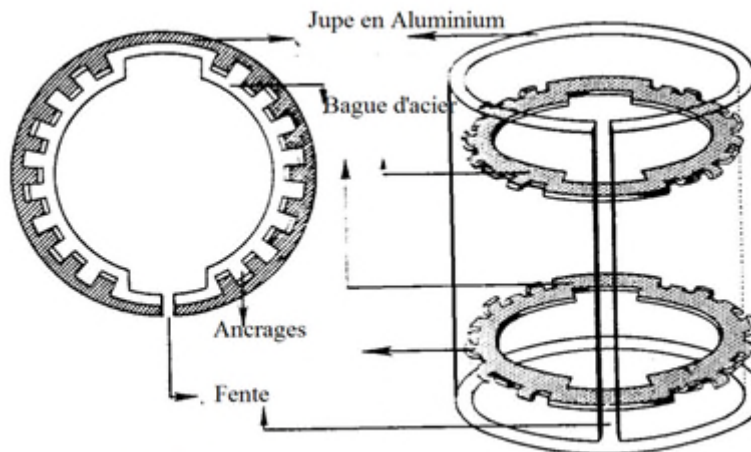


fig.27 – Constitution d'un piston thermostatique

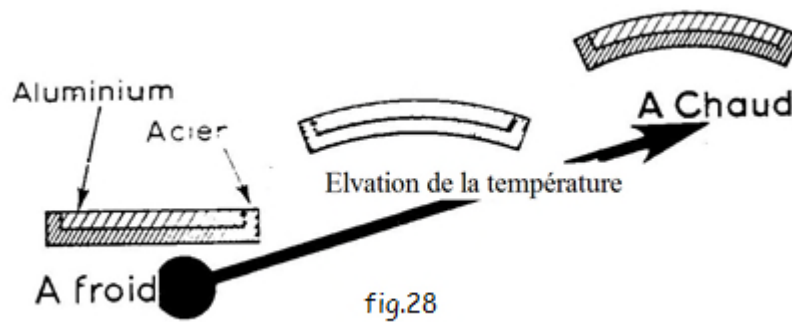
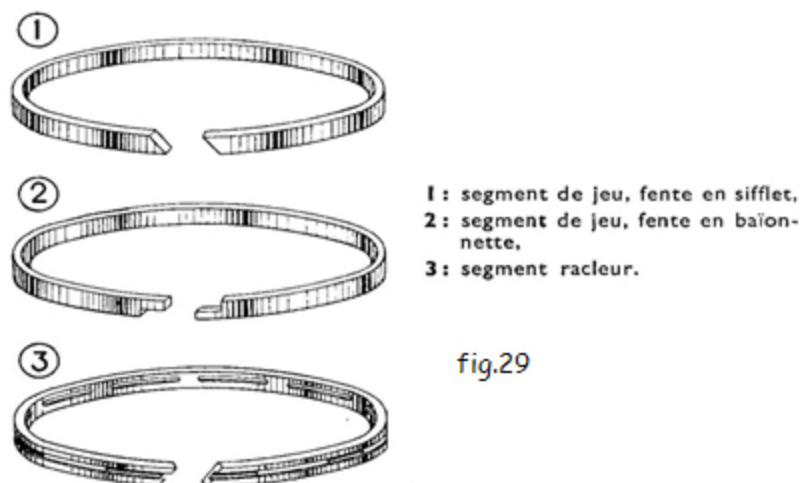


fig.28

### II.6.1.5 Les segments

Le jeu de fonctionnement entre le cylindre et le culot du piston est, à froid, de l'ordre de 0,06 mm sur le diamètre pour un alésage de 80 mm. Pour obturer cet espace, des anneaux élastiques, en fonte douce, appelés segments, sont placés dans des gorges du piston. Ils sont fendus pour permettre leur engagement dans les gorges et leur donner une certaine élasticité. La forme de la fente est généralement en sifflet ; les fuites qui pourraient se produire en cet endroit sont réduites au minimum en répartissant les fentes sur toute la périphérie du piston (fig. 29).



#### II.6.1.5.1 Nombre et nature des segments

On monte en général trois ou quatre segments ; deux ou trois placés dans les gorges supérieures du piston sont les segments d'étanchéité ; le dernier, placé dans la gorge inférieure, est appelé segment racleur : son rôle est d'éviter les remontées d'huile et il reçoit dans ce but une forme telle que l'huile parvient au fond de la gorge d'où elle peut descendre dans le carter inférieur par l'intérieur du piston (fig. 29).

#### II.6.1.5.2 Segments spéciaux

Dans un moteur usagé, le segment-racleur est peu efficace; aussi l'huile parvient-elle en grande quantité aux segments supérieurs, leur traversée est facilitée par le mouvement du piston : à la descente, le segment portant vers le haut, l'huile pénètre au fond de la gorge et à la montée cette issue est obturée, si bien que l'huile s'échappe au-dessus du piston. On dispose, dans la gorge supérieure, un segment pressé à la fois contre le cylindre et contre les parois de la gorge du piston ; deux anneaux plats, élastiques, sont écartés verticalement par des ressorts. L'emploi de ce dispositif permet de corriger l'excès de consommation d'huile et les pertes de compression.

### II.6.1.6 L'axe de piston

Il assure l'articulation de la bielle dans le piston. En acier cémenté et trempé, puis rectifié, il ne doit pas pouvoir se déplacer et venir contre le cylindre, qu'il rayerait en raison de sa dureté supérieure.

L'axe peut être monté :

- libre dans le piston, serré dans la bielle (fixation par vis); libre dans la bielle, serré dans le piston (fixation par vis);
- libre dans le piston et dans la bielle (l'axe est maintenu par des arrêts en acier, appelés circlips (fig. 30), ou par des bouchons en bronze.

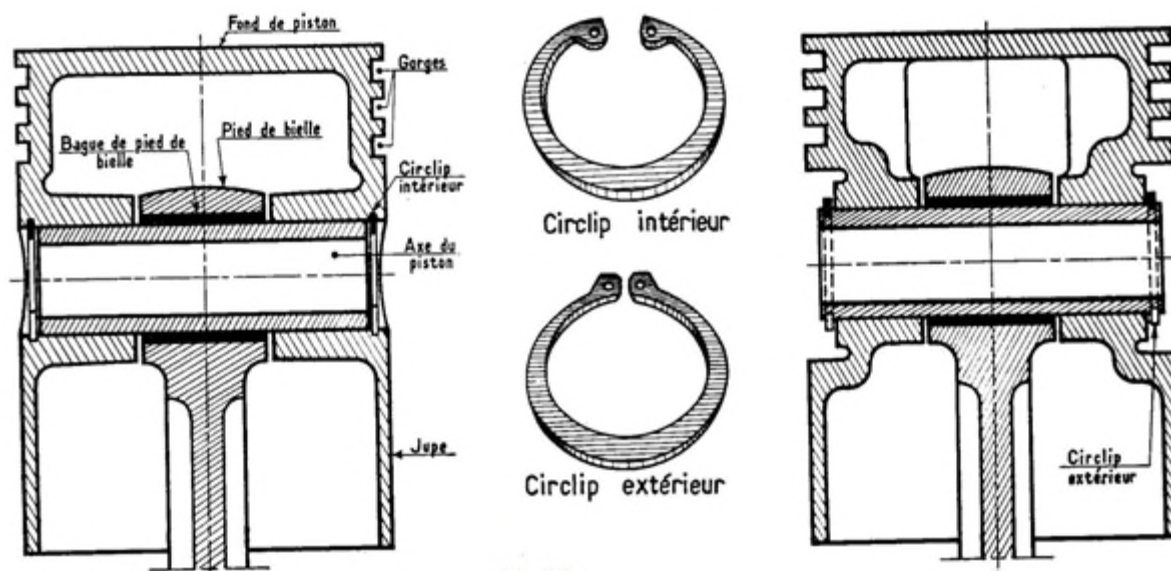


fig.30

## II.6.2 La bielle

### II.6.2.1 Rôle

La bielle permet l'échange d'énergie mécanique entre le piston, animé d'un mouvement rectiligne alternatif, et le vilebrequin, doté d'un mouvement de rotation.

### II.6.2.2 Description

Elle comporte (fig.31) :

- le pied, articulé sur l'axe du piston ;
- la tête, articulée sur le maneton du vilebrequin ;
- le corps, qui transmet les efforts entre les deux articulations.

### II.6.2.3 Efforts et formes résultantes

#### II.6.2.3.1 Corps

Si les gaz agissaient seuls sur l'embellage, les efforts sur la bielle se limiteraient à une force de compression, importante lors de l'explosion, et à une très faible force d'extension lors de l'aspiration.

Aux grandes vitesses atteintes par les moteurs actuels, les forces d'inertie, proportionnelles aux masses mobiles et au carré de la vitesse du vilebrequin, jouent un rôle aussi important que les gaz. Les efforts qu'elles exercent font apparaître de l'extension et surtout de la flexion alternée. Le

matériau choisit doit résister à la fatigue : l'acier demi dur au chrome-nickel permet d'ébaucher la pièce par matriçage. Le duralumin, rarement employé, a pour seul avantage de fournir une pièce très légère. Une section en I est adoptée pour sa bonne résistance à la flexion et au flambage.

### II.6.2.3.2 Articulations

Si les deux articulations subissent sensiblement les mêmes efforts, les surfaces de contact travaillent à des vitesses différentes, l'articulation du piston ne dépassant pas  $45^\circ$  au total, alors que le vilebrequin décrit  $360^\circ$ ; le degré d'usure et les chances de grippage peuvent être rendues identiques sur les deux articulations pour une largeur de portée égale, à un diamètre de tête supérieur au diamètre de pied. Le pied est fermé, car l'axe peut le traverser de part en part. La tête, au contraire, est en deux parties, l'une solidaire du corps, l'autre, appelée chapeau, boulonnée sur la première et enserrant le maneton du vilebrequin (fig.31).

Le constructeur a adopté une des dispositions suivantes :

- un jeu de coussinets démontables permet de remplacer aisément les pièces usées; ils sont en bronze phosphoreux (cuivre, étain, antimoine) (fig.32), ou en acier revêtu de métal rose (cuivre, plomb, étain);
- une garniture de métal antifriction, ou régule, alliage de plomb, d'étain, d'antimoine, de cuivre fondant au-dessous de  $400^\circ$ , protège le vilebrequin contre les températures excessives. Lorsque ce revêtement a fondu, le jeu qui subsiste provoque un bruit caractéristique : le moteur « cogne » annonçant qu'une bielle est « coulée ».
- Le régule est appliqué directement sur la tête de bielle, après un étamage qui permet une bonne adhérence, ou sur un jeu de coussinets en bronze ou en acier étamé;
- une couronne d'aiguilles substitue au frottement de glissement, le frottement de roulement ; cette disposition se rencontre également sur certaines motocyclettes.

### II.6.2.4 Coussinets minces

Les coussinets du type classique, bronze ou bronze régulé de plusieurs millimètres d'épaisseur sont chers et mal utilisés. Actuellement des coussinets de bielle et de vilebrequin sont élastiques, constitués par une couche de régule déposée sur un support en acier (fig.33) : chaque demi-coussinet est découpé dans une bande de feuillard laminé à froid, décapé, étamé, et revêtu d'anti friction sur une des faces; la couche de régule varie de 0,05 mm à 0,35 mm; l'épaisseur du feuillard varie en raison directe de l'alésage à garnir, afin que le formage à froid demeure possible.

Exemple : 1,6 mm pour un maneton de bielle de 38 à 60 mm de diamètre;  
2,4 mm pour un tourillon de vilebrequin de 60 à 79 mm de diamètre.

L'expérience montre qu'une faible épaisseur de régule accroît la longévité du coussinet (fig.33) l'écoulement plastique est rendu plus difficile, en même temps que la chaleur s'évacue plus rapidement.

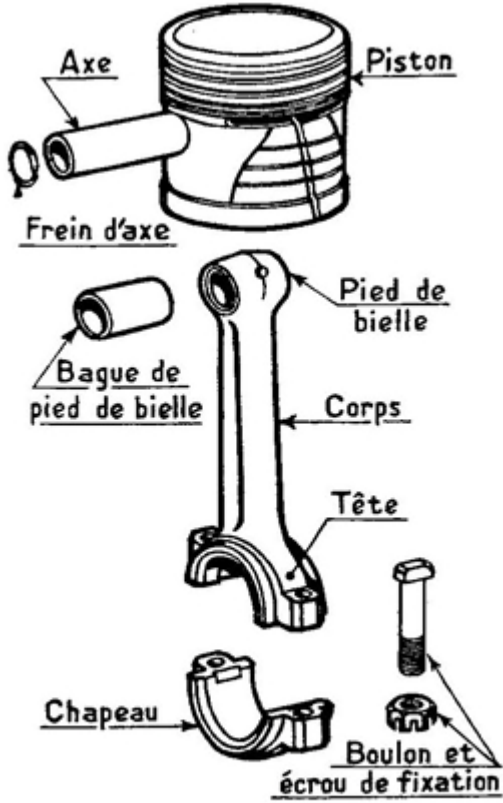


fig.31

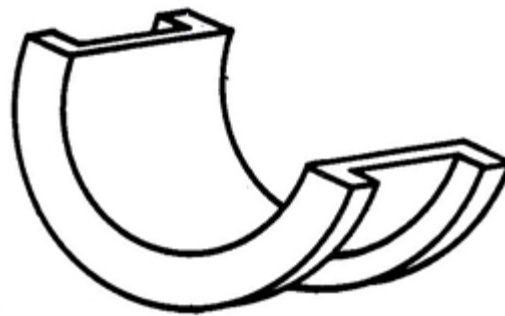
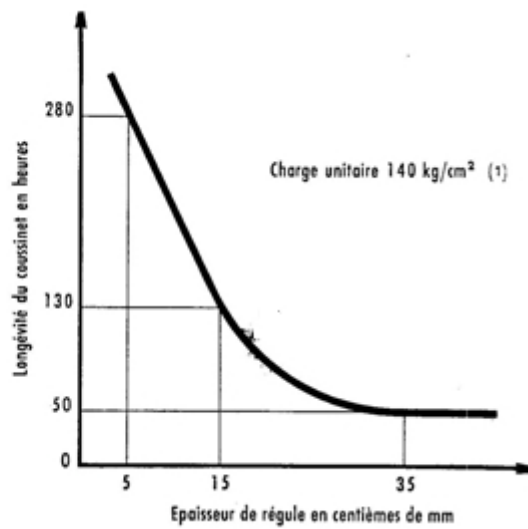


fig.32



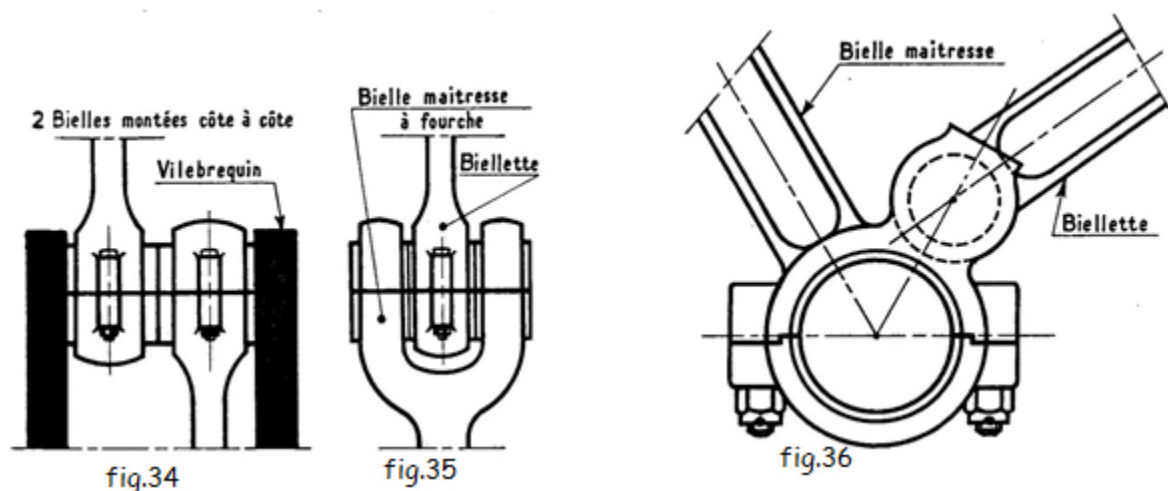
fig.33



### II.6.2.5 Bielle pour moteurs en «V»

Deux cylindres du même V ont leur bielle articulée sur le même maneton. On a l'une des solutions suivantes :

- deux têtes de bielle placées côte à côte sur le même maneton (fig. 34);
- une bielle articulée directement sur le maneton, l'autre, appelée biellette, articulée concentriquement sur la première, ceci pour réduire la largeur de portée (fig. 35);
- une des deux bielles, appelée bielle-maîtresse, est articulée sur le maneton et porte une patte sur laquelle vient s'articuler la biellette (fig. 36).



## II.6.3 vilebrequin (arbre moteur)

### II.6.3.1 Rôle

Le vilebrequin sert principalement à transmettre l'énergie mécanique entre les bielles et le volant. Il permet en outre: de mettre le moteur en marche à l'aide d'une manivelle que l'on adapte à une extrémité; de commander l'ensemble des mécanismes auxiliaires (distribution, pompe à huile, ventilateur, dynamo); d'amener l'huile sous pression aux différentes têtes de bielle.

### II.6.3.2 Efforts et construction

Le vilebrequin travaille à la flexion entre les paliers sur lesquels il prend appui par les tourillons, et à la torsion autour de son axe de rotation par suite des efforts que transmettent les bielles. Il est, en outre, le siège de vibrations (de torsion principalement) et il s'use aux surfaces de frottement (Manetons et tourillon).

Il est réalisé:

- par forgeage ; la composition du métal varie avec les genres de moteurs : en général on emploie l'acier mi-dur au chrome ou l'acier mi-dur manganosiliceux. L'arbre subit un traitement thermique après usinage; une trempe martensitique lui donne un maximum de dureté, un revenu est effectué entre 500° et 550°;

- par moulage ; le métal est une fonte spéciale comportant du chrome, du silicium et du cuivre. Le traitement thermique comprend un recuit d'homogénéisation suivi d'une trempe et d'un revenu poussé.

### II.6.3.3 Eléments d'un vilebrequin

Le vilebrequin comprend (fig. 15 et 15bis) :

- les tourillons qui permettent à l'arbre de reposer sur les paliers du carter;
- des manetons ou soies sur lesquels viennent s'articuler les bielles;
- l'emplacement du volant et, à l'autre extrémité;
- des canalisations intérieures pour le graissage sous pression des manetons et des tourillons;
- éventuellement, des portées recevant les amortisseurs de vibrations de torsion (damper).

### II.6.3.4 Disposition des éléments

Elle est conditionnée par le nombre de paliers et de cylindres du moteur, par l'obligation de répartir régulièrement les impulsions des cylindres sur deux tours de rotation, tout en assurant le meilleur équilibrage possible. L'équilibrage statique est réalisé lorsque, au repos, l'ensemble des équipages mobiles est en équilibre indifférent : l'arbre étant vu en bout, les manetons apparaissent symétriques par rapport à l'axe (fig.38). L'équilibrage dynamique est obtenu lorsque, en marche, les forces centrifuges des éléments du vilebrequin (chaque maneton recevant en supplément les deux tiers environ de la masse d'une bielle) s'annulent ; cet équilibrage est plus difficile à réaliser que le précédent, qu'il implique d'ailleurs.

Le tableau suivant résume la disposition (ou calage) des manetons couramment adoptée

| Nombre de cylindres | Calage des manetons | Nombre de paliers                         |
|---------------------|---------------------|---|
| Deux (fig.39)       | 360° et 180°        | 2   |
| Quatre (fig.40)     | 1 80°               | 2 pour moteurs de faible cylindrée        |
| Six (fig.41)        | 120°                | 3 en général                              |
| Huit en V (fig. 42) | 90°                 | 5 pour moteurs poussés                    |
| Huit en ligne       | 90°                 | 3 dont deux paliers extrêmes et 1 central |
|                     |                     | 4 séparant les manetons 2à2               |
|                     |                     | 7 séparant les manetons 1à1               |
|                     |                     | 5   |
|                     |                     | 7 et 8                                    |



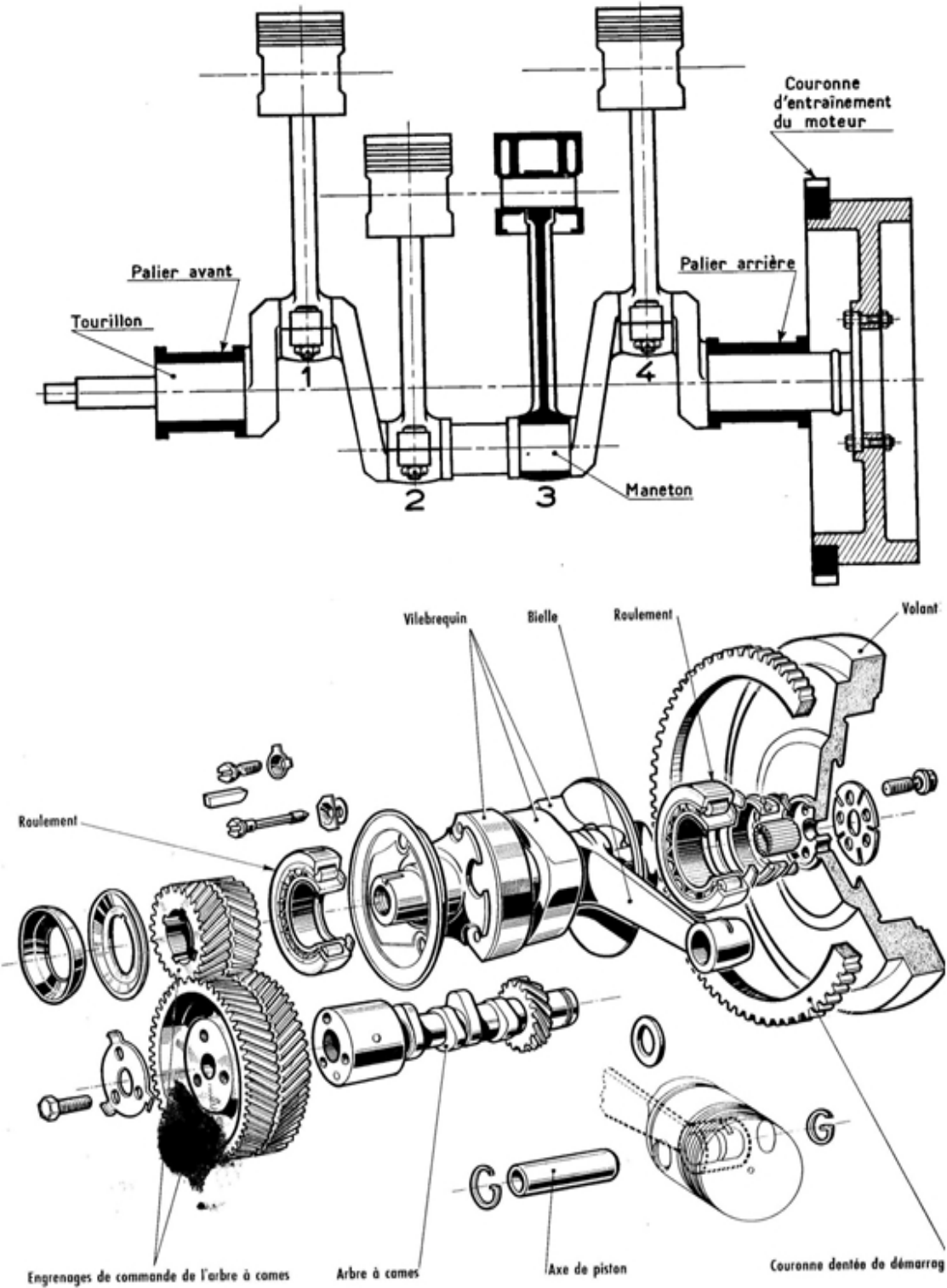
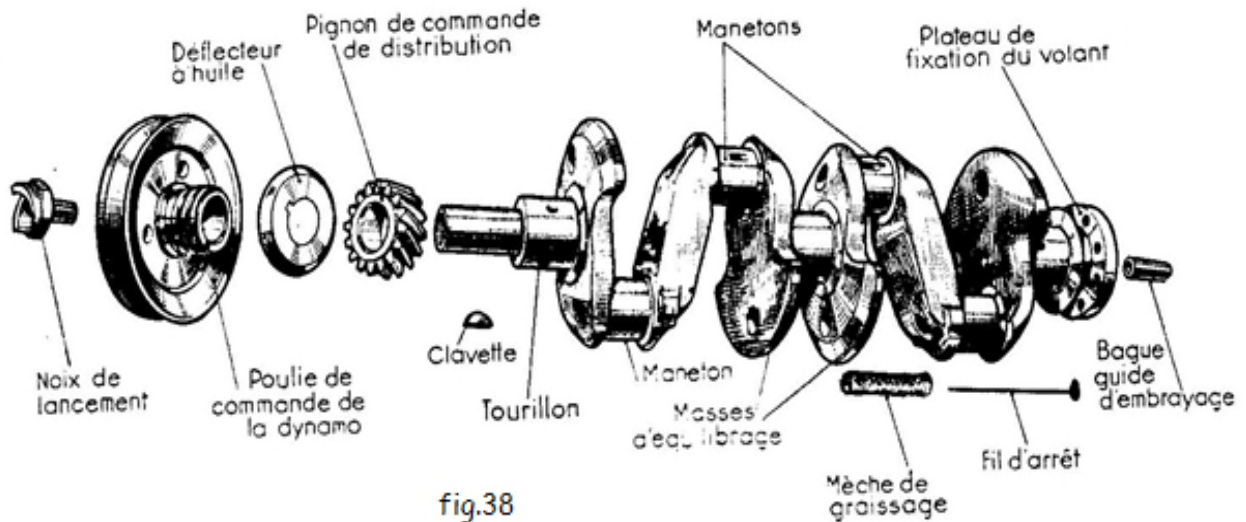


fig.37





La constitution du vilebrequin de moteur à 8 cylindres présente quelques particularités :

- *Huit cylindres en V (fig. 42)*

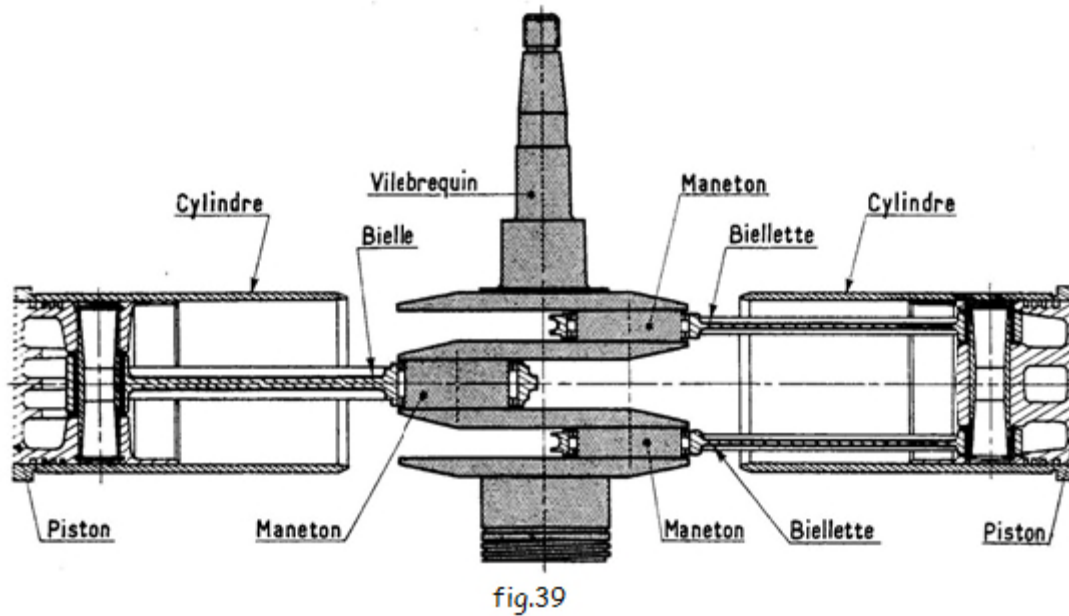
L'arbre comporte quatre coudes, chacun recevant deux bielles ; les coudes extrêmes A et D sont à 180° dans un même plan ; les coudes centraux B et C sont également à 180°, mais dans un plan perpendiculaire au premier.

- *Huit cylindres en ligne (en voie de disparition)* Il existe deux solutions :
- Encadrer un vilebrequin à quatre cylindres par deux demi-vilebrequins à quatre cylindres, disposés dans un plan perpendiculaire au premier (2 - 4 - 2).
- Placer à la suite l'un de l'autre, mais dans des plans perpendiculaires, deux vilebrequins à quatre cylindres (type 4-4).

### II.6.3.5 Montage du vilebrequin

Le vilebrequin repose sur les paliers du carter dans des coussinets en acier ou en bronze régulé, ou entièrement en bronze au plomb, graissés sous pression. L'ensemble des paliers constitue la ligne d'arbre. Le montage s'effectue «par-dessus»: les paliers sont en deux parties, l'arbre est déposé sur les demi-portées inférieures, puis on assemble les chapeaux des paliers.

Certains constructeurs utilisent, au lieu de coussinets, des roulements à billes ou à rouleau, mais on ne peut pas constituer les chemins de roulement par deux pièces distinctes ; c'est le vilebrequin qu'il faut construire en plusieurs parties, s'il y a plus de deux paliers, afin que chaque tourillon puisse être mis en place séparément, comme l'exige l'emploi des roulements. Chaque coude est démontable aussi, ce type de vilebrequin, très est réservé à des moteurs spéciaux.



## II.6.4 volant moteur (fig.43)

### II.6.4.1 Rôle

Le volant joue un rôle régulateur. Le cycle à quatre temps ne comporte qu'un temps moteur; le volant, monté en bout du vilebrequin, emmagasine sous forme d'énergie cinétique une partie de l'énergie produite au cours de l'explosion pour la restituer pendant les trois temps résistants et assure au moteur une vitesse sensiblement constante à un régime déterminé, les écarts entre les vitesses extrêmes ne dépassant pas  $1/60$  de la vitesse moyenne. Le moteur peut ainsi tourner au ralenti sans «caler». Ce rôle, important pour un moteur monocylindrique, diminue quand le nombre des cylindres augmente. En effet, pour un monocylindre, il y a un seul temps moteur pour deux tours de l'arbre; pour un quatre cylindres, il y a quatre temps moteurs pour deux tours de l'arbre, soit une impulsion tous les  $1/2$  tours; pour un six cylindres, il y a six temps moteurs pour deux tours de l'arbre, soit une impulsion tous les  $1/3$  tours. Plus le nombre des cylindres est élevé, meilleure est la régularisation.

### II.6.4.2 Constitution du volant moteur

L'énergie cinétique accumulée à une vitesse donnée dépendant uniquement du moment d'inertie du volant, cet organe à une forme judicieuse afin d'utiliser au mieux le poids mort et l'encombrement consacrés au volant. On éloigne le plus possible les masses de l'axe afin d'augmenter le moment d'inertie, disposition qui conduit à une toile mince et à une jante

massive (fig.37). L'acier est souvent employé, car les grandes vitesses de rotation font apparaître des forces centrifuges qui tendent à faire éclater le volant.

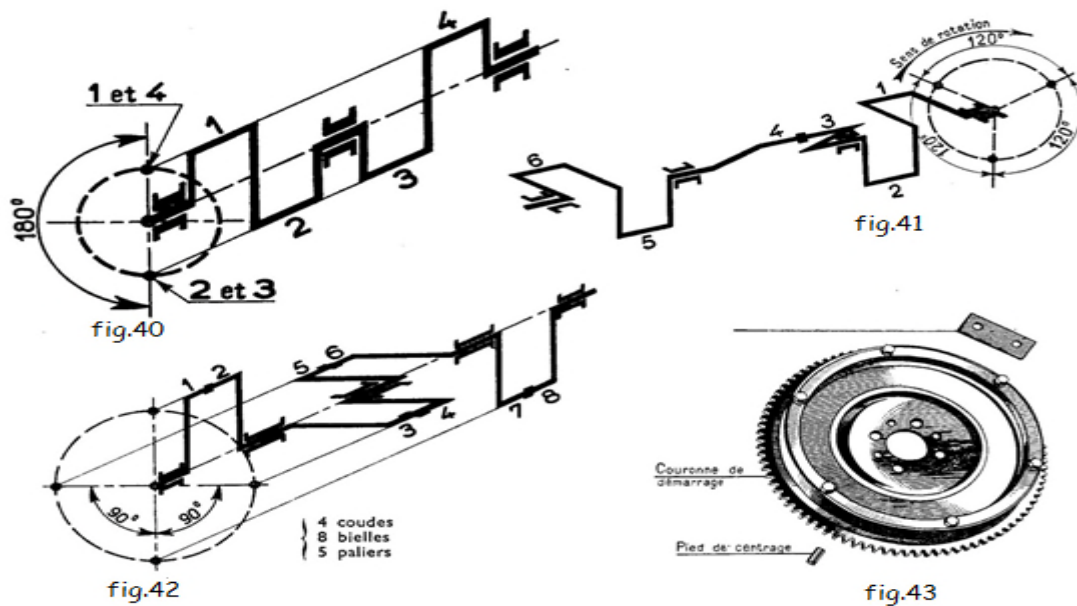
### II.6.4.3 Montage

L'assemblage du volant au vilebrequin a une grande importance en raison des efforts répétés que la bride d'assemblage est chargée de transmettre; le moindre jeu dans la fixation se traduit par des vibrations. Le volant, comme le vilebrequin, doit être équilibré; il est procédé à équilibrer dynamiquement le volant et vilebrequin assemblés.

### II.6.4.4 Dispositifs d'entraînement

- par cône et clavette, écrou et contre-écrou;
- par plateau d'entraînement, la fixation de la toile au plateau se faisant par boulons, l'entraînement par rondelle de cisaillement (fig.38).

Au démarrage le moteur est lancé électriquement à l'aide du démarreur : une couronne dentée solidaire du volant reçoit le mouvement d'un pignon éclipsable (fig. 43).



## Chapitre III : La distribution

### III.1 rôle

Les organes de distribution assurent l'admission et l'échappement des gaz dans les cylindres; ces opérations devant commencer et se terminer à des instants du cycle rigoureusement déterminés.

La distribution nécessite les organes suivants :

- des orifices, ménagés dans la chambre de combustion ;
- des obturateurs, ouvrant et fermant ces orifices;
- un dispositif de commande, actionnant ces obturateurs.

Ces organes sont calculés pour que les gaz circulent rapidement dans le temps très court imparti à l'admission et à l'échappement : 2/100 de seconde pour un moteur à quatre temps tournant à 1500 tr/mn ; pour cela le constructeur prévoit :

- de larges sections de passage pour éviter le laminage des gaz;
- la commande quasi instantanée des obturateurs pour qu'ils fonctionnent à pleine ouverture pendant toute la durée de l'opération.

### III.2 types de distribution

La forme de l'obturateur caractérise une distribution :

- Dans la distribution à soupapes, l'orifice, circulaire, est muni d'un siège conique; la soupape a un mouvement de levée perpendiculairement à son siège. L'ensemble du dispositif est généralement monté dans la culasse, ce qui complique ses formes et limite les dimensions des orifices.
- Dans la distribution sans soupapes, les orifices sont des lumières disposées sur le pourtour du cylindre. L'obturation est réalisée par deux chemises cylindriques qui coulissent le long du cylindre.

### III.3 Moteur a soupapes

#### III.3.1 Soupape (fig. 1)

Chaque cylindre comporte une soupape d'aspiration et une soupape d'échappement, parfois deux soupapes de chaque espèce. Chaque soupape comprend, outre l'obturateur proprement dit ou tête de soupape, une tige de commande appelée queue de soupape ; un poussoir (fig. 5) agit sur la queue pour réaliser l'ouverture. La fermeture s'effectue sous l'action d'un ressort de rappel, comprimé lors de l'ouverture. L'étanchéité est assurée par le simple contact des surfaces coniques qui tendent à s'emboîter l'une dans l'autre : la tête et le siège de soupape subissent un usinage soigné suivi d'un rodage. Le matériau constituant la soupape a une dureté superficielle élevée : en effet, des chocs ont lieu contre le poussoir et contre le siège en raison des manœuvres rapides que le dispositif doit assurer.

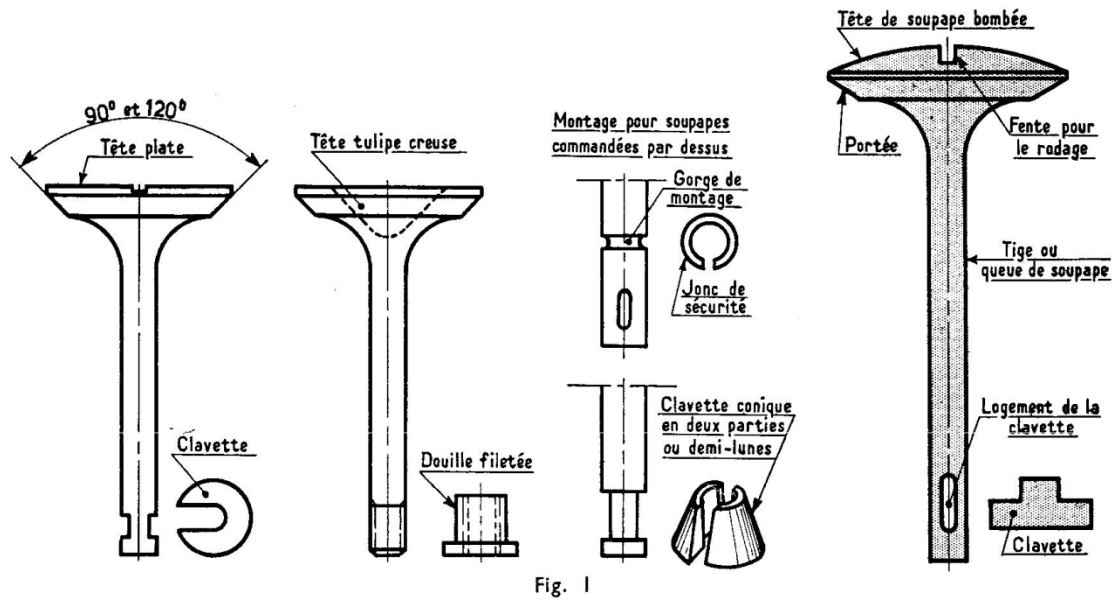


Fig. 1

De plus, le matériau des soupapes conserve ces caractéristiques mécaniques à la haute température (environ 800°). La soupape d'admission, refroidie par les gaz frais, est en acier au nickel ; la soupape d'échappement soumise, au contraire, à l'action des gaz brûlés, est constituée par un acier contenant du nickel, du chrome, et du tungstène, et résistant bien au fluage (lentes déformations à haute).

### III.3.2 Commande du poussoir de la tige

La commande du poussoir de la tige s'effectue à l'aide de cames (fig. 2 et 3), tournant d'un mouvement uniforme. Les cames nécessaires à la distribution dans un moteur dont les cylindres sont en ligne ou en V sont solidaires d'un arbre à cames (fig. 3).

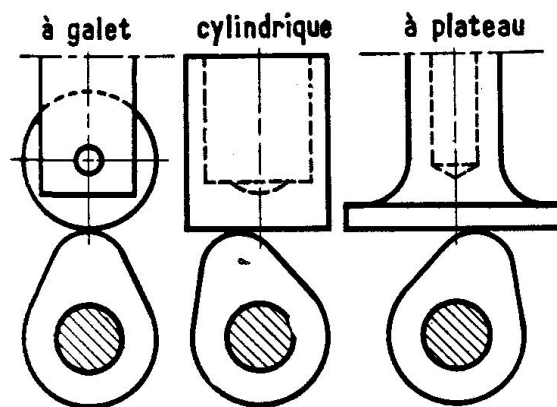


Fig. 2



importante en raison des températures atteintes dans la chambre d'explosion, si bien que la tête de soupape ne porte plus sur son siège. Au montage l'écart est réglé entre came et poussoir à une valeur (0,05 à 0,3 mm) telle que la soupape porte parfaitement lorsque la température de régime est atteinte.

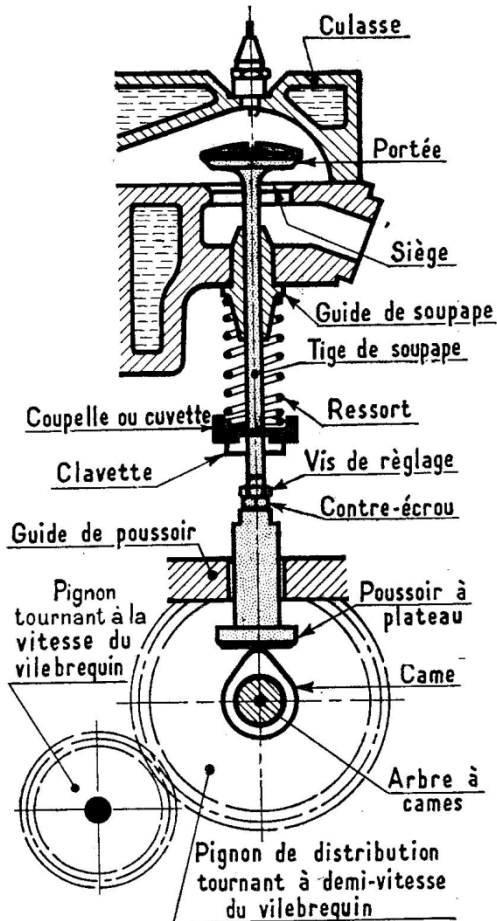


Fig. 5

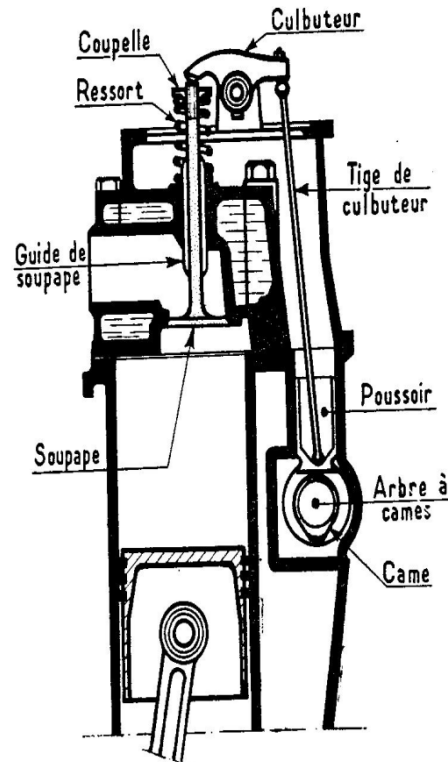
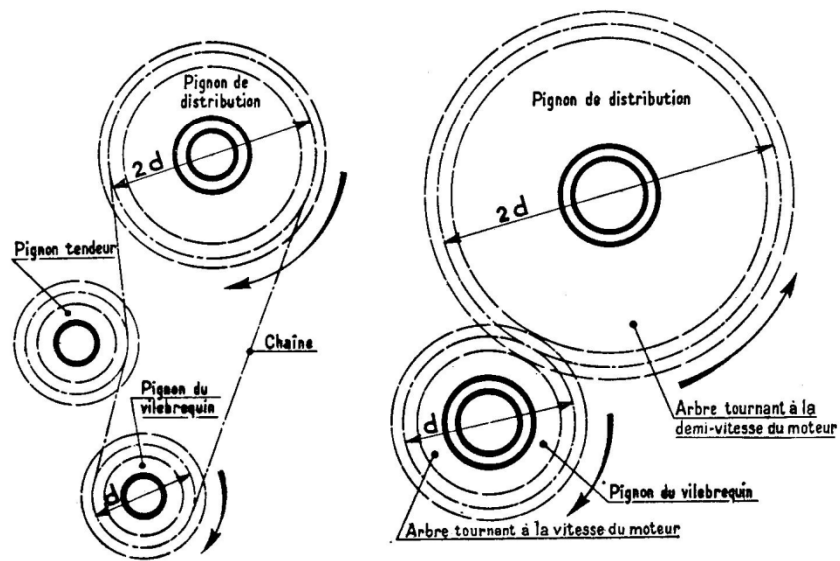
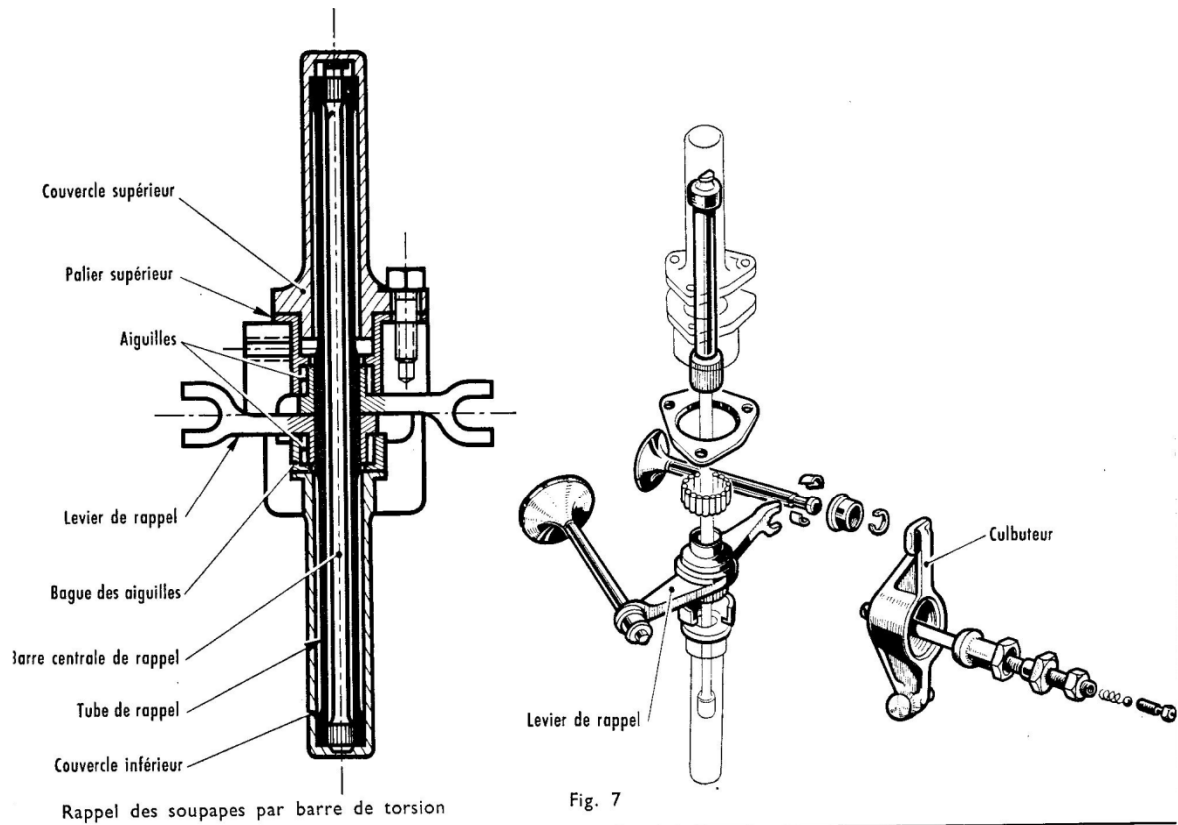


Fig. 6

### III.3.7 Commande de l'arbre à cames

#### III.3.7.1 Vitesse de rotation

Il y a une aspiration et un refoulement pour chaque cylindre tous les deux tours de l'arbre moteur. Chaque soupape se soulève aussi tous les deux tours de vilebrequin: l'arbre à cames fait un tour quand l'arbre moteur en fait deux (fig. 8).



### III.3.7.2 Dispositifs employés

L'entraînement de l'arbre à cames est assuré avec une grande exactitude afin que le rapport de sa vitesse avec celle du vilebrequin reste rigoureusement égal à 0,5 à toutes les allures. Une courroie n'est pas utilisable en raison du glissement : on emploie toujours des roues dentées.

- deux engrenages cylindriques assurent la transmission si la distance des axes est réduite; ils sont: tous deux dans le carter et les arbres tournent en sens inverses (fig. 7);



- trois engrenages cylindriques permettent de réduire la dimension des pignons pour une même distance des axes; les arbres tournent dans le même sens;
- deux couples d'engrenages coniques : les arbres peuvent être très éloignés tout en conservant des pignons peu encombrants;
- une chaîne pourrait exiger une troisième roue permettant de régler la tension, mais conduit à une forme de carter plus simple (fig. 9).

La commande est rendue silencieuse en choisissant selon le cas soit un des pignons en céloron (toile imprégnée de résine synthétique), soit une chaîne du type silencieux.

### **III.4 Moteur sans soupapes**

Ce moteur est actuellement abandonné, mais il est cité dans ce document seulement à titre indicatif. Ce moteur est constitué de deux chemises coulissantes intercalées le piston et le cylindre : la chemise extérieure glisse dans le cylindre, la chemise intérieure, ajustée dans la présidente, guide le piston (fig.10) ; chaque chemise comporte des lumières, ou fenêtres. La commande des chemises se fait par deux biellettes, montées sur deux excentriques ; tous les excentriques d'un moteur à plusieurs cylindres en ligne sont montés sur le même arbre, appelé arbre à excentriques, entraîné par le vilebrequin après une réduction de vitesse dans le rapport 0,5.

#### **III.4.1 Fonctionnement**

L'admission et l'échappement ont lieu lorsque les fenêtres de chaque chemise et l'orifice correspondant du cylindre sont en coïncidence; cette condition est remplie par un calage correct des excentriques sur leur arbre (fig. 10).

Les glissements ont lieu sur de grandes surfaces cylindriques, dans le sens des génératrices, et les jeux sont réduits afin d'obtenir une bonne étanchéité: un excellent graissage est donc indispensable pour éviter le grippage entre ces surfaces qui glissent dans de très mauvaises conditions, et pour réduire les pertes de puissance résultant d'un frottement excessif.

#### **III.4.2 Ordre de fonctionnement des cylindres**

La forme d'un vilebrequin est déterminée de telle sorte que les temps moteurs soient répartis à intervalles réguliers au cours de la rotation et que les paliers soient soustraits aux effets des forces centrifuges (condition d'équilibrage dynamique).

Il sera déduit aisément de la position des coudes de l'arbre moteur l'ordre dans lequel l'allumage doit être effectué, alors que pour les moteurs à quatre cylindres et plus, il existe toujours plusieurs solutions. Si les cylindres étaient alimentés par des tubulures d'admission rigoureusement identiques, le choix ne s'imposerait pas entre les diverses solutions, mais, dans la pratique, les cylindres les plus éloignés du carburateur risquent d'être mal remplis. De plus, des oscillations de torsion dangereuses peuvent apparaître pour certains ordres d'allumage.

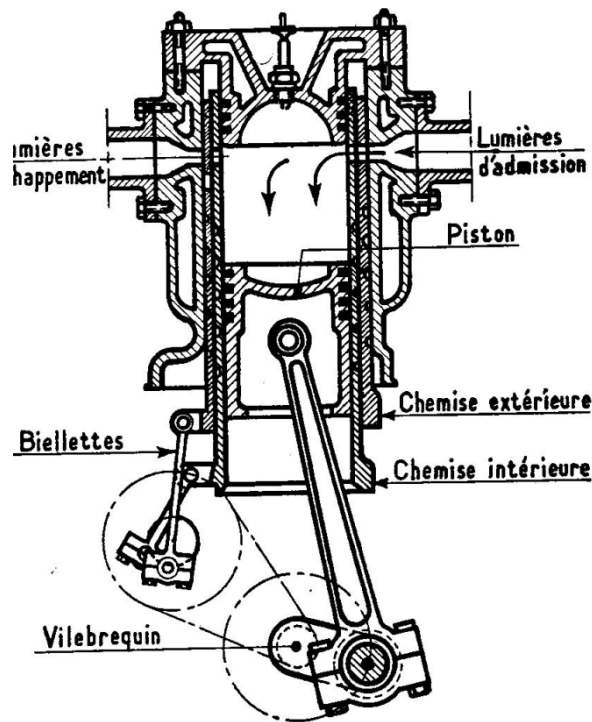


Fig. 10

### III.4.3 moteur a quatre cylindres

Si les pistons des cylindres n°1 et n°4 se trouvent simultanément au P.M.H., nous aurons, pendant leur **course descendante** (fig.11) :

- dans le cylindre n° 1 « admission »,
- dans le cylindre n° 4 « explosion et détente ».

Les pistons des cylindres n° 2 et n° 3 se trouvent alors au P.M.B.; nous avons, pendant leur **course ascendante**, deux solutions :

- dans le cylindre n° 2 « compression »,
- dans le cylindre n° 3 « échappement ».

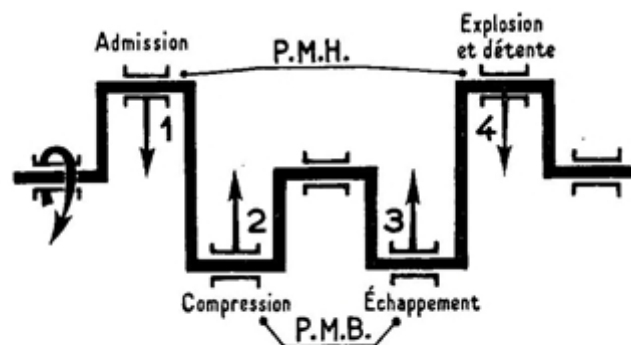


fig.11

Le fonctionnement des cylindres se fait dans l'ordre 1 - 3 - 4 - 2 (fig. 12).

Ou bien dans le cas ou:

- dans le cylindre n° 2 « échappement »,
- dans le cylindre n° 3 « compression ».

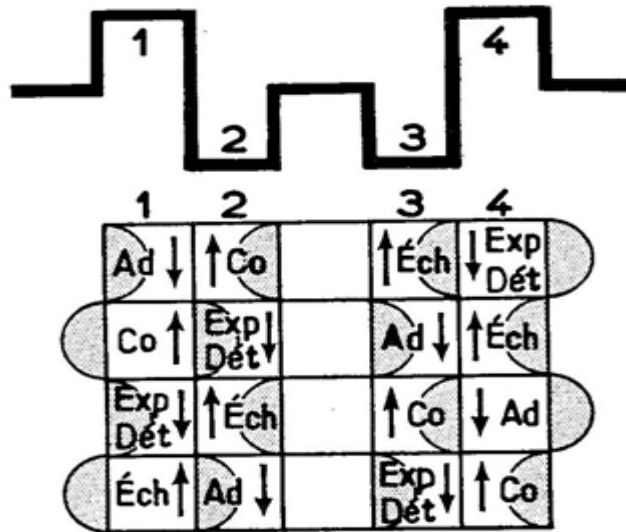


fig.12

Le fonctionnement des cylindres se fait dans l'ordre 1 - 2 - 4 - 3 (fig. 13).

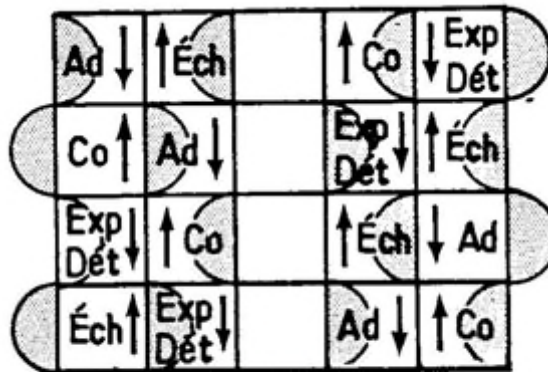


fig.13

des gaz subit des changements d'orientation nettement différents dans le second cas (difficile de 3 à 1, facile de 1 à 2) et sensiblement identiques dans le premier cas (de 4 à 2 et : de 2 à 1) : généralement le choix tombe sur l'ordre 1 - 3- 4- 2, qui assure un remplissage plus uniforme (fig. 14).

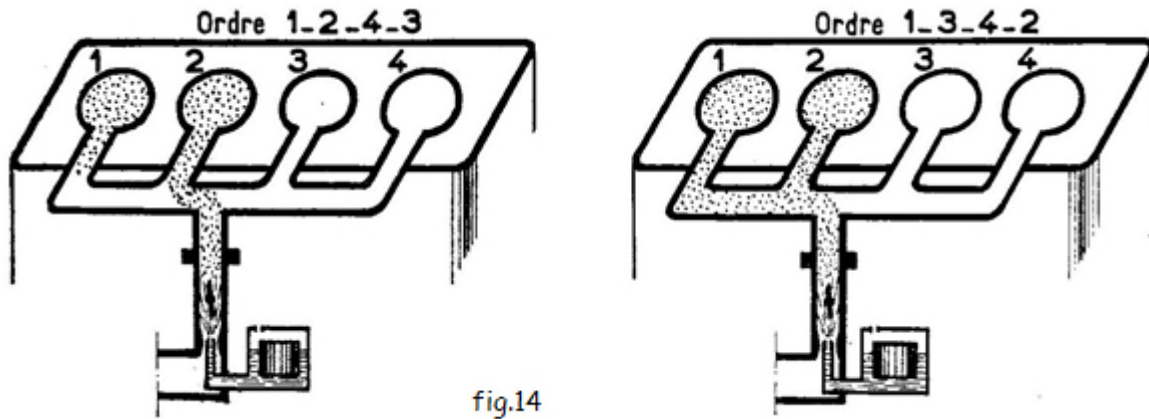


fig.14

### III.4.4 moteur à six cylindres

Les manetons du vilebrequin se présentent toujours deux à deux au P.M.H. (fig. 5). En regardant le vilebrequin de l'avant (côté noix de lancement du moteur), on voit passer successivement au P.M.H. les manetons des cylindres: 1 et 6, 2 et 5, 3 et 4.

Pour répartir les efforts sur le vilebrequin dans le temps, il ont le choix entre plusieurs ordres d'allumage : 1 - 2 - 3 puis 6 - 5 - 4, 1 - 5 - 3 puis 6 - 2 - 4, 1 - 2 - 4 puis 6 - 5 - 3, il adopte en général l'ordre 1 - 5-3- 6- 2- 4, mais le remplissage des cylindres extrêmes reste difficile c'est pourquoi certains constructeurs prévoient deux carburateurs, un par groupe de trois cylindres. Les volets des gaz sont commandés simultanément ; il faut que leur fonctionnement soit parfaitement synchronisé.

|      | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0°   | Admission<br>↓   | Compression<br>↑ | Échappement<br>↑ | Admission<br>↓   | Échappement<br>↑ | Détente<br>↓     |
| 120° | Admission<br>↓   | Détente<br>↓     | Échappement<br>↑ | Compression<br>↑ | Admission<br>↓   | Échappement<br>↑ |
| 240° | Compression<br>↑ | Échappement<br>↑ | Admission<br>↓   | Détente<br>↓     | Admission<br>↑   | Échappement<br>↑ |
| 360° | Détente<br>↓     | Échappement<br>↑ | Admission<br>↓   | Échappement<br>↑ | Compression<br>↑ | Admission<br>↓   |
| 120° | Échappement<br>↑ | Admission<br>↓   | Compression<br>↑ | Échappement<br>↑ | Détente<br>↓     | Admission<br>↓   |
| 240° | Échappement<br>↑ | Admission<br>↓   | Détente<br>↓     | Admission<br>↓   | Échappement<br>↑ | Compression<br>↑ |

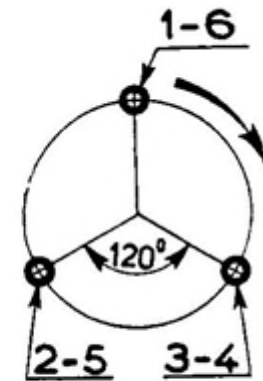


fig.15

### III.4.5 moteur à huit cylindres

#### III.4.5.1 Huit cylindres en ligne

Il est obligatoire de monter deux carburateurs, chacun alimentant un groupe de quatre cylindres. L'ordre d'allumage dépend de la forme du vilebrequin dont il existe.

### III.4.5.2 Huit cylindres en V à 90°

Pour un vilebrequin conforme au schéma indiqué (fig. 16), et en numérotant les cylindres de gauche 1, 3, 5, 7, les cylindres de droite 2, 4, 6, 8, l'ordre d'allumage généralement adopté est :

*1- 3- 6- 5- 4- 8- 7- 2.* Le mélange carburé sortant du carburateur alimente les tubulures d'admission droite et gauche presque alternativement : il n'y a jamais plus de deux cylindres du même côté alimentés consécutivement

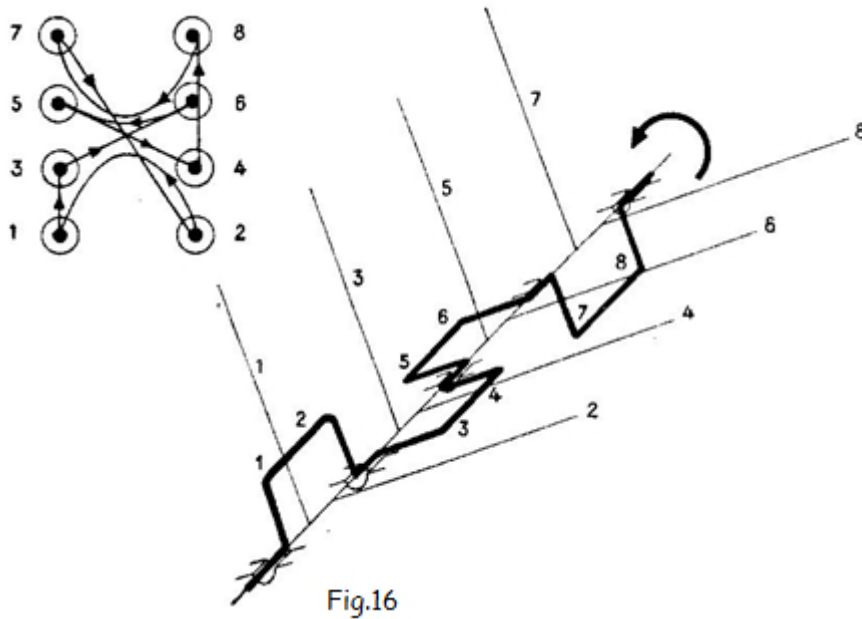


Fig.16

## Chapitre IV : Graissage

### IV.1 Frottement

Les organes mobiles des mécanismes comportent des pièces guidées par des surfaces contre lesquelles agissent des efforts. Lorsque les pièces sont en contact l'une contre l'autre par des actions perpendiculaires à la surface de contact, il n'y a pas tendance au glissement. Si l'on veut obtenir un déplacement relatif des pièces, il faut, en plus, exercer un effort parallèlement à la surface de contact. Cet effort mesure la résistance au glissement, ou adhérence, ou encore la force de frottement qui s'oppose au mouvement (fig. 1).

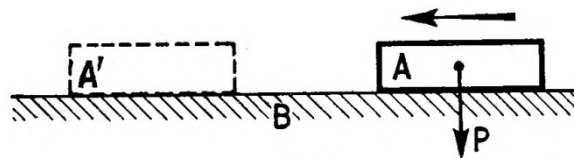


Fig. 1

La force de frottement n'est qu'une fraction de l'effort perpendiculaire : le rapport de l'effort tangentiel à l'effort perpendiculaire aux surfaces constitue le coefficient de frottement. Le frottement est un phénomène parfois utile, pour ralentir le mouvement relatif de deux pièces, ou pour assurer leur entraînement progressif; mais, dans la plupart des mécanismes, le frottement est nuisible car :

- il augmente les efforts subis par les pièces, et conduit à majorer leurs dimensions;
- il est très accentué aux faibles vitesses, ce qui fait du démarrage une période critique dans la conduite d'un véhicule;
- il dissipe de l'énergie et par voie de conséquence, abaisse le rendement des mécanismes;
- il entraîne l'usure des surfaces, les efforts tangentiels arrachant des particules de métal;
- l'énergie perdue par frottement se transforme en chaleur, ce qui oblige à refroidir les surfaces pour éviter : des dilatations des pièces, des difficultés de lubrification et un accroissement de l'usure.

### IV.2 Types de frottement

Le frottement entre deux pièces peut se produire de plusieurs manières :

#### IV.2.1 Frottement à sec

Le coefficient de frottement dépend de la nature des matériaux en contact, il est utilisé pour l'une des pièces la fonte, le bronze, l'antifriction ; il dépend aussi du poli réalisé sur les surfaces (les aspérités des pièces sont réduites par une rectification, un rodage, une superfinish (fig. 2).

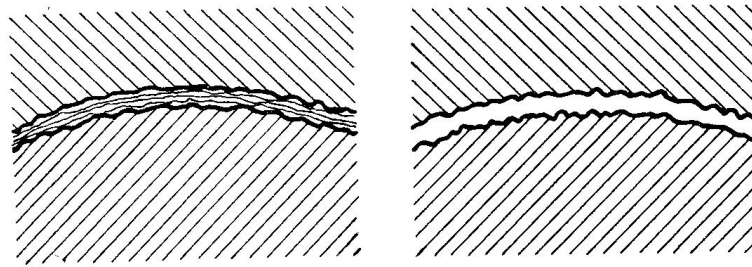


Fig. 2. — Aspect des surfaces de contact à grande échelle.

Ce type de frottement est dangereux car le dégagement de chaleur peut ramollir une des surfaces au point qu'elle finisse par se coller littéralement à l'autre pièce; le mouvement devient impossible (grippage). Il est utilisé que pour monter des mécanismes fonctionnant rarement et à vitesse réduite, par exemple l'induit de démarreur.

#### IV.2.2 Frottement onctueux

Les surfaces de contact avec une couche de lubrifiant, auront un coefficient de frottement qui se réduit de la moitié au dixième de sa valeur à sec.

Exemples:

- Acier cémenté et rectifié sur bronze et antifricion :  $0,01$  à  $0,05$
- Acier sur bronze, sur fonte :  $0,05$  à  $0,12$
- Acier sur acier :  $0,12$  à  $0,3$

Le lubrifiant joue un rôle assez mal connu, car le contact se fait métal sur métal comme dans le frottement à sec.

#### IV.2.3 Frottement hydrodynamique

Dans le cas où : les surfaces ont reçu un bon poli, l'ajustement laisse un jeu modéré entre les pièces, la vitesse de rotation est très élevée, le lubrifiant n'est pas trop fluide, le débit de lubrifiant est très abondant, les surfaces se séparent légèrement sous l'action de l'huile, qui se met sous pression, c'est le phénomène du « coin d'huile » (fig. 3).

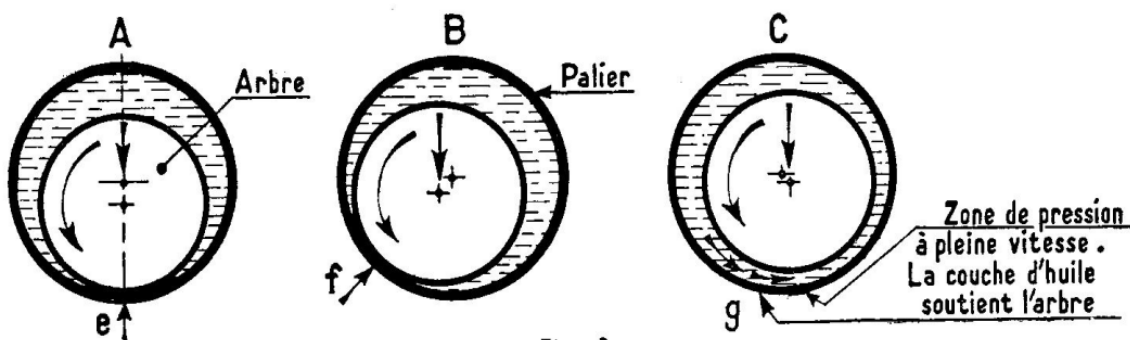


Fig. 3

Ce phénomène s'explique en remarquant que l'arbre entraîne l'huile le long de sa périphérie : lorsque l'espace entre l'arbre et l'alésage se réduit, l'huile cherche à passer et de ce fait agit à la manière d'un coin, sans avoir le temps de revenir en arrière si la vitesse de rotation est assez élevée. Le coefficient de frottement devient très faible; il prend couramment des valeurs voisines de 0,002 à 0,005, ce qui s'explique par la suppression du contact métal sur métal.

Au cours du fonctionnement d'un mécanisme, ces types de frottement peuvent exister successivement:

- Au démarrage, où en cas d'oubli du graissage, le frottement a lieu à sec.
- Lorsque la lubrification est réalisée par de la graisse, ou par un faible débit d'huile, ou quand la vitesse est lente, le frottement est onctueux ; c'est le cas le plus fréquent.
- Si toutes les conditions précédemment énoncées sont simultanément réalisées, il y a frottement hydrodynamique ou graissage parfait.

### IV.3 Propriétés des lubrifiants

Plusieurs qualités sont à rechercher :

- a. **viscosité** : résistance du lubrifiant à l'écoulement. Grâce à elle peut s'établir le coin d'huile.
- b. **L'onctuosité** : l'aptitude du lubrifiant à adhérer aux surfaces métalliques. Cette qualité est à considérer dans tous les cas où le coin d'huile ne peut exister.
- c. **stabilité** : résistance du lubrifiant à la décomposition sous l'action des gaz (air, essence, gaz brûlés) et de la température.
- d. **point de congélation très basse** : permet aux mécanismes de fonctionner à basse température, l'huile restant fluide, et la viscosité modérée.
- e. **point d'inflammation très élevé** : autorise le fonctionnement à haute température sans qu'il y ait carbonisation du lubrifiant (fig. 4).

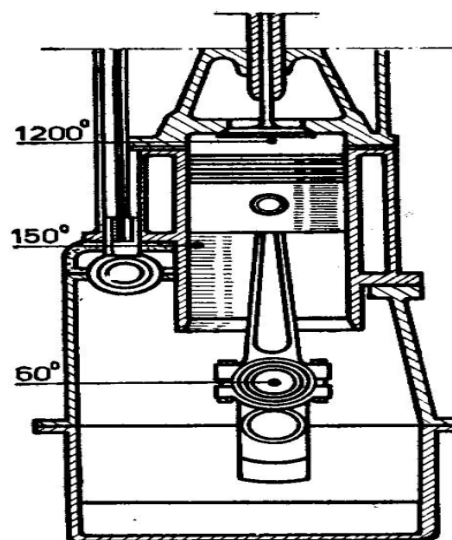


Fig. 4



## IV.4 Principaux lubrifiants

### IV.4.1 Les huiles végétales (huile de ricin en particulier)

Ont un point d'inflammation élevé et un bas point de solidification; elles conviennent aux moteurs d'aviation et aux moteurs de course, soumis à des conditions très dures. Par contre, elles sont instables et d'un prix élevé.

### IV.4.2 Les huiles minérales (extraites du pétrole)

Ont les propriétés d'être stables et visqueuses. Elles conviennent dans la plupart des applications en raison de la diversité des types existants. Selon leur viscosité, on les classe en huiles légères, moyennes et épaisses.

### IV.4.3 Les graisses consistantes

Sont des mélanges d'un savon calcaire (chaux et huile végétale) avec une huile minérale en émulsion; elles conviennent aux faibles vitesses, ou pour former un bourrelet obturateur.

### IV.4.4 Le graphite

En poudre très fine (graphite colloïdal) est utilisé incorporé à l'huile ou à la graisse consistante.

- Le lubrifiant est choisi en fonction de l'organe à graisser, dans le moteur convient l'huile minérale moyenne en hiver, semi fluide en été, additionné de graphite, surtout pendant l'opération du rodage ou le grippage.
- Dans les engrenages (boîte de vitesse, différentiel et roulements), on choisit huile épaisse. Dans les articulations (direction, ressorts, freins....) huile très épaisse et la graisse consistante.

## IV.5 Étude des surfaces

### IV.5.1 Matériaux utilisés

L'usure étant inévitable pour les pièces en contact, en des matériaux de dureté nettement distinctes afin qu'une seule des pièces soit détériorée. On réduit les frais de remplacement en affectant le matériau destiné à s'user sur la pièce la moins coûteuse à remplacer. Les portées des pièces à mouvement de rotation rapide sont usinées sur des bagues de bronze ou d'acier revêtu de métal antifriction : ce dernier, fondant entre 2000 et 4000 disparaît dès que la température de fonctionnement s'élève anormalement, provoquant un jeu qui signale l'avarie.

*Exemple :*

- Vilebrequin en acier mi-dur traité
- tête de bielle régulée (c'est-à-dire garnie d'antifriction), coussinets anti frictionnés.
- Arbre à cames en acier traité
- palier avec bague de bronze.
- Soupape en acier au nickel-chrome
- guide de soupape en fonte.
- Chemise de cylindre en fonte traitée

- segments en fonte douce ou en fer fritté.

#### **IV.5.2 États des surfaces**

On cherche à obtenir le meilleur fini possible et, selon les pièces, on met en œuvre une des opérations suivantes : rectification : portées de vilebrequin, d'arbre à cames, cames et poussoirs, tiges de soupape ; rodage : cylindres; brunissage: têtes de bielle ; polissage : pistons.

#### **IV.5.3 Tolérances sur les côtes ajustées**

Il faut prévoir entre les surfaces un jeu correct pour tenir compte des phénomènes suivants :

- la contraction lors du montage d'une bague forcée ;
- la dilatation en fonctionnement, due à l'échauffement ;
- l'usure importante en cours de rodage;
- conditions favorisant l'établissement du coin d'huile.

#### **IV.6 Modes de graissage**

La lubrification des surfaces en mouvement ne s'impose pas au même degré pour tous les mécanismes de l'automobile. Suivant le type de fonctionnement, il existe trois modes de graissage.

##### **IV.6.1 Lubrification perdu**

Certains organes peuvent s'accommoder d'un graissage sommaire, soit que leur vitesse et leur amplitude de mouvement soit réduite : tringlerie de direction, de frein, etc., soit que leur fonctionnement soit intermittent ou ait lieu sous faible charge : accessoires divers, dynamo, ventilateur, etc. Le lubrifiant, contenu dans une burette à huile ou dans une pompe à graisse, est introduit dans un graisseur, passe entre les surfaces, puis s'écoule à l'extérieur.

Les dispositifs sont simples, mais présentent quelques inconvénients :

- les qualités du lubrifiant ne sont pas épuisées,
- les abords des mécanismes sont toujours souillés de lubrifiant,
- l'alimentation est modérée et irrationnelle car elle n'a lieu qu'à l'arrêt,
- des corps étrangers s'introduisent toujours au cours de l'alimentation.

##### **IV.6.2 Lubrification récupéré**

Les organes mobiles essentiels du véhicule : pistons, bielles, vilebrequin, distribution et transmission, exigent, au contraire, un graissage soigné dont le rôle est multiple :

- Réduire l'énergie perdue par frottement et, pour cela, créer les conditions du graissage parfait.
- Évacuer la chaleur produite par le frottement.
- Protéger les surfaces en contact avec l'air ou les gaz chauds contre la corrosion.
- Réduire le bruit des mécanismes.

- Le lubrifiant se déplace en circuit fermé, repassant constamment entre les surfaces, si bien que:
- les qualités du lubrifiant sont épuisées;
- l'huile étant récupérée, les mécanismes conservent une certaine propreté;
- l'alimentation peut être commandée par les organes mobiles, donc augmenter en même temps que leur vitesse;
- il est possible d'assurer un débit de lubrifiant important, comme l'exige l'établissement du coin d'huile, et un bon refroidissement des organes mobiles.

Ces avantages sont acquis au prix d'une plus grande complexité de construction :

- un réservoir d'huile étanche, ou carter;
- un système d'adduction du lubrifiant aux surfaces à graisser;
- l'étanchéité au passage des organes mobiles travers le carter ;
- un orifice de remplissage, un niveau, un trou de vidange ;
- un dispositif de sécurité (regard, thermomètre, manomètre);
- éventuellement le filtrage et le refroidissement de l'huile.

#### IV.6.3 Adduction du lubrifiant

a) Barbotage des organes mobiles dans le carter (fig. 5)

Les pièces en mouvement plongent dans le lubrifiant qui est projeté et ruisselle sur les parois, pouvant alimenter au passage des trous de graissage. Ce dispositif est employé pour le graissage de certains moteurs, de la boîte de vitesses, et du différentiel.

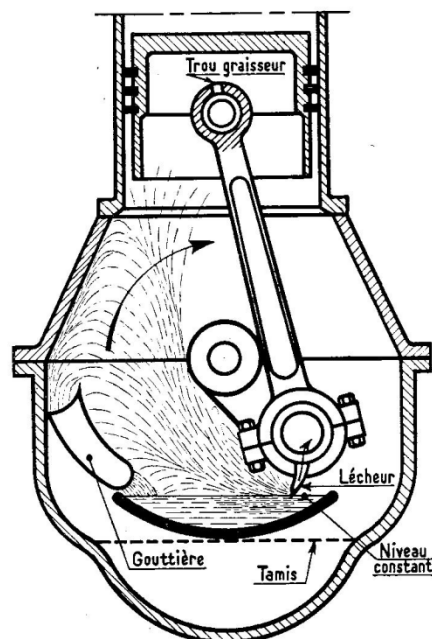
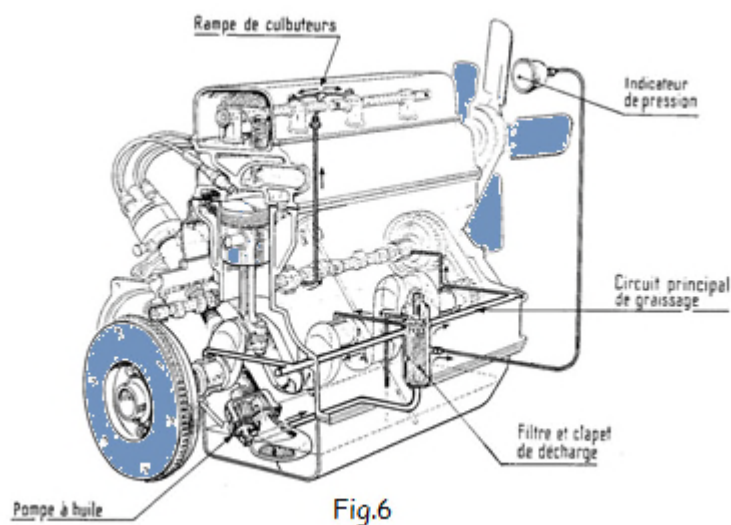


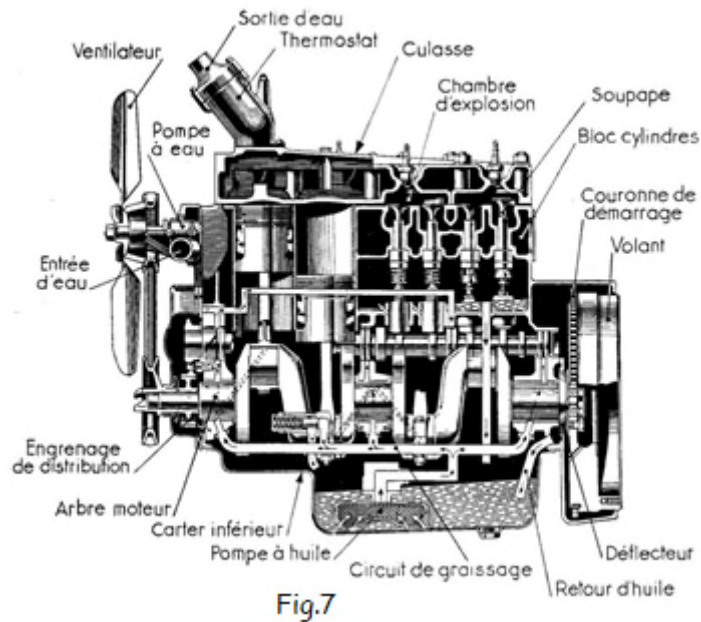
Fig. 5

#### IV.6.4 Par pompe et canalisations (fig. 6 et 7)

Un système de canalisations, comportant de nombreuses ramifications aboutissant aux surfaces à graisser, est alimenté à l'aide d'une pompe. Quand la canalisation débouche entre les surfaces mobiles, l'huile est à une pression peu différente de celle de la pompe, d'où la dénomination de graissage sous pression ; c'est le cas du vilebrequin, des têtes de bielle, des pignons de distribution, de la rampe des culbuteurs. Cette disposition n'en pas applicable à tous les mécanismes; lorsque leur mouvement est rectiligne alternatif, une canalisation débouchant à proximité des surfaces dirige un jet d'huile à travers l'atmosphère du carter : il a graissage par projection ; c'est le cas des cylindres et pistons, des axes de piston, des tiges de papets et de leur guide (fig. 6 et 7).



La pompe employée est une pompe à engrenages (fig. 8) fonctionnant sous 1 à 3 kg/cm<sup>2</sup> afin d'assurer le débit nécessaire en surmontant les pertes de charge des canalisations; ces dernières sont constituées par des tubes de laiton ou de cuivre, ou percées directement dans les pièces intermédiaires forages du vilebrequin et de la bielle (fig. 7).



#### IV.7 Étanchéité

Elle doit être réalisée non seulement pour éviter les pertes de lubrifiant, mais aussi pour protéger certains organes qui ne fonctionnent qu'à sec : certains embrayages, les segments de frein. L'étanchéité carter-embayage est obtenue au moyen d'un dispositif monté à la sortie de l'arbre moteur, et choisi parmi les suivants :

- pignon à denture hélicoïdale,
- turbine d'arrêt d'huile,
- collerette de retour d'huile.

L'étanchéité cylindre-carter est plus difficile à réaliser et n'est jamais parfaite. Des gaz brûlés s'introduisant dans le carter, entre segments et chemise de cylindre, peuvent créer une surpression qui a pour effet de chasser les odeurs à l'intérieur du véhicule. Ils ont prévu un orifice, appelé reniflard, qui met la partie supérieure du carter en communication avec l'atmosphère.

#### IV.8 Filtrage

Après un certain temps de fonctionnement, l'huile renferme des impuretés d'origines diverses :

- des particules métalliques provenant de l'usure des pièces,
- des dépôts de carbone dus à la décomposition de l'huile,
- de l'essence qui s'introduit en cas de mauvaise carburation ou d'excès d'essence au démarrage,
- de l'eau provenant de fuites entre carter ou culasse, ou suintant à l'endroit d'un goujon d'assemblage, ou due à la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les gaz brûlés qui passent dans le carter inférieur.

On filtre l'huile pour retenir ces dépôts. Sur une dérivation de la canalisation de refoulement on dispose un filtre à armature métallique garnie de tissus de coton ou de feutre. Sur l'aspiration, à l'entrée de la pompe, on monte un tamis métallique ou crépine (fig. 8).

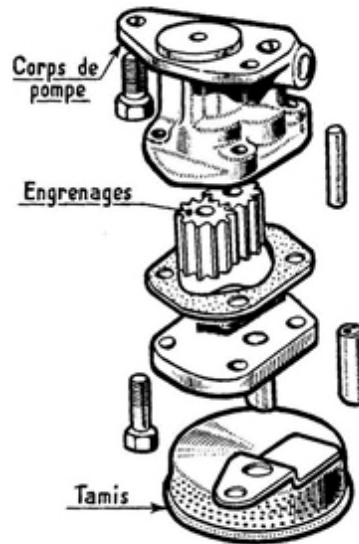


Fig.8

#### IV.9 Refroidissement d'huile

La chaleur est évacuée par le carter inférieur par :

- conductibilité : il y a avantage à constituer ce carter en un métal bon conducteur, tel l'aluminium;
- convection : la face inférieure du carter est refroidie par le courant d'air qui s'établit en marche sous le véhicule; l'échange peut être amélioré par des ailettes. Certains moteurs possèdent un système de ventilation du carter inférieur (fig. 9.)

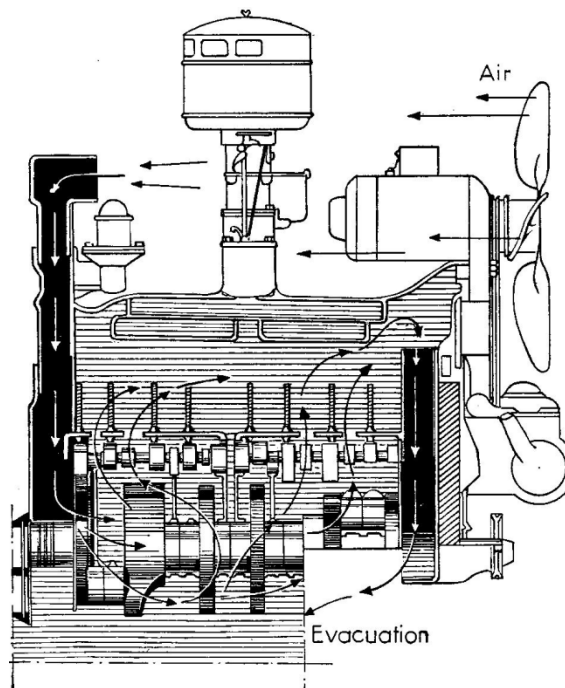
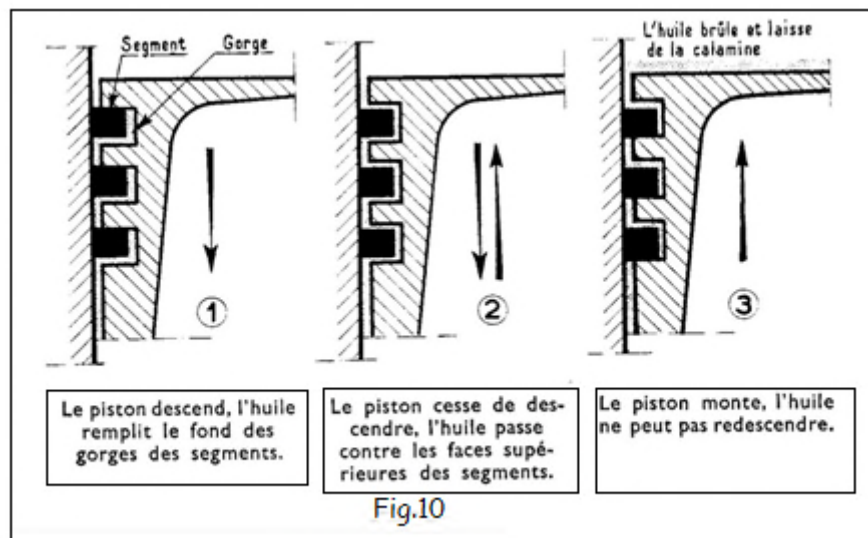


Fig. 9

### IV.9.1 Carbonisation

Après un certain temps d'usage, il arrive que de l'huile de graissage passe entre pistons et cylindres (fig. 10) ou le long des guides de soupapes. Au cours de la combustion, elle brûle en même temps et forme un résidu charbonneux appelé calamine « carbonisation ». La calamine se dépose sur le fond des pistons, les têtes des soupapes et sur les parois de la chambre d'explosion, en y adhérant fortement. La carbonisation présente de nombreux inconvénients :

- Le volume de la chambre d'explosion diminue puisque la calamine constitue une surépaisseur; le taux de compression augmente, la combustion est fréquemment détonante et le moteur devient bruyant.
- La calamine, mal refroidie, constitue des points chauds, provoquant l'autoallumage, et des retours au carburateur: les gaz frais peuvent s'enflammer dès qu'ils arrivent à la soupape d'admission et brûler depuis la sortie du gicleur.
- La calamine formée entre les électrodes des bougies nuit à la formation de l'étincelle électrique, le moteur a des ratés.
- La fermeture des soupapes est gênée par la calamine, le moteur manque de compression. Dès que la consommation d'huile devient excessive, la révision du moteur s'impose.



### IV.10 refroidissement

La combustion des gaz s'opère à haute température et des échanges thermiques ont lieu entre les gaz brûlés et les parois qui sont à leur contact. La chaleur se transmet ainsi aux parois des cylindres, à la culasse et aux pistons, et par suite de la conductibilité de ces organes à l'ensemble du bloc-moteur.

À un degré moindre, le frottement des organes mobiles absorbe de l'énergie qui se transforme en chaleur. Il en résulte de cette chaleur une élévation de température qui se traduit par :

- la dilatation des pièces, et par suite une diminution des jeux;
- la modification des propriétés des matériaux selon la température atteinte et la durée de l'échauffement,
- l'altération du lubrifiant qui se carbonise peu à peu et laisse des dépôts de calamine dans la chambre de combustion;
- la diminution du taux de remplissage des cylindres par suite de la dilatation des gaz frais;
- des risques accrus d'auto-allumage.
- Donc pour éviter les conséquences de cette élévation de la chaleur dans le moteur, Il faut évacuer les calories en excès : c'est ici qui vient le rôle du refroidissement.
- La chaleur provenant du frottement des pièces en mouvement est transmise en grande partie au lubrifiant, se refroidit au contact du carter soumis à l'action du courant d'air extérieur.
- La chaleur dégagée par la combustion des gaz, et transmise aux parois, est évacuée par le système de refroidissement proprement dit :
  1. Soit refroidissement par air, le cylindre étant muni d'ailettes que vient lécher l'air en mouvement par circulation naturelle ou forcée (ventilateur);
  2. soit refroidissement par eau (l'ensemble cylindre-culasse est à double paroi), par circulation d'eau naturelle ou forcée, les calories sont transmises à un radiateur qui les cède au courant d'air.

Pour obtenir la transmission de chaleur maximum au travers d'une paroi, il faut réaliser les conditions suivantes :

- le métal de la paroi doit être bon conducteur ;
- la paroi doit être mince et offrir une grande surface de contact au fluide réfrigérant ;
- le fluide réfrigérant doit circuler à grande vitesse pour évacuer la chaleur au fur et à mesure; il doit avoir une chaleur spécifique élevée;
- le refroidissement est d'autant meilleur que la température extérieure est plus basse.

#### **IV.10.1 Dispositifs de refroidissement**

##### **IV.10.2 refroidissement par air**

Exemple : moteurs de faible cylindrée, motocyclettes.

Les carter, bloc-cylindres et culasse sont le plus souvent en alliage léger de haute conductibilité. On leur donne une épaisseur faible obtenue grâce au moulage en coquille. La surface extérieure est augmentée à l'aide d'ailettes de refroidissement (fig. 11), exposées au courant d'air créé par le déplacement du véhicule. Cependant, lorsque le moteur tourne au ralenti et que le véhicule est arrêté, la chaleur s'évacue encore suffisamment si le moteur est découvert (motocyclettes); si, par contre, le moteur comporte un capot, il y a un ventilateur qui assure un courant d'air énergique.



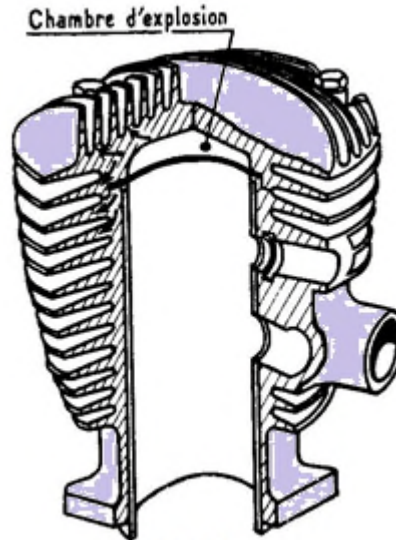


Fig.11

#### IV.10.3 Refroidissement mixte par eau et par air

Pour les puissances plus élevées, le refroidissement par air devient insuffisant. Seul le carter reste refroidi par air. Pour le reste, ils ont utilisé un fluide de refroidissement auxiliaire, l'eau, qui a la chaleur spécifique la plus élevée et ne coûte rien. Au cours de sa circulation, l'eau transporte la chaleur au radiateur, qui est refroidi par l'air ambiant.

#### IV.10.4 Circulation de l'eau

Elle est facilitée par de larges sections de passage. Ce mouvement peut être entravé et même interrompu par des dépôts de tartre (dus à la précipitation de sels minéraux) ou de rouille (corrosion des parois internes du bloc-cylindres s'il est en fonte). La circulation peut se faire de deux manières :

#### IV.10.5 Circulation naturelle

Sans dispositif auxiliaire. En raison des différences de densité, l'eau chaude, plus légère que l'eau froide, a tendance à monter vers le radiateur. Il s'établit alors une circulation suivant le principe du thermosiphon (fig. 12), mais la vitesse maximale est faible (0,25 m/s).

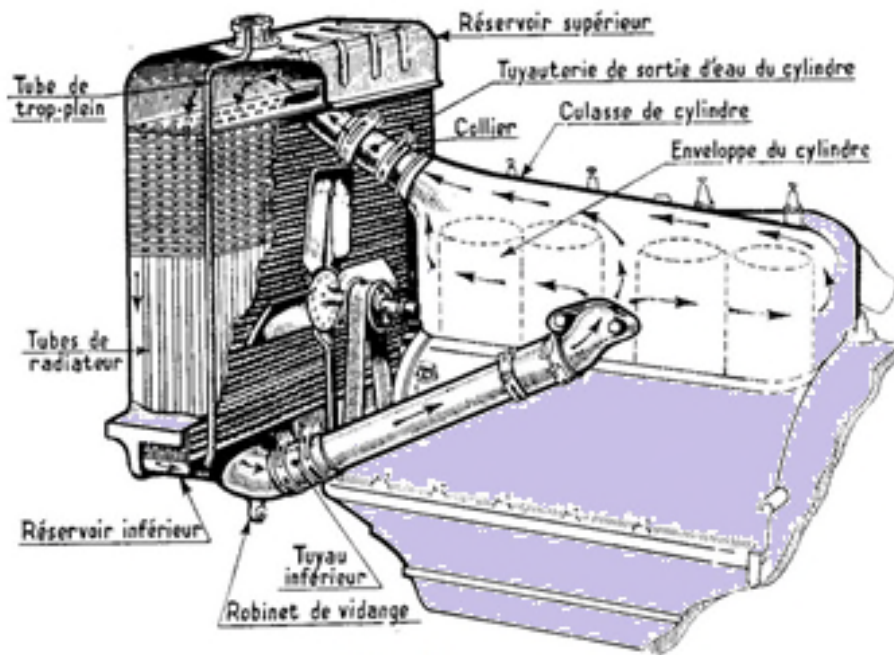


Fig.12

#### IV.10.6 Circulation forcée

L'eau est mise en mouvement à l'aide d'une pompe, généralement centrifuge, qui aspire l'eau chaude à la partie supérieure de la culasse et l'envoie au radiateur (fig.13). La vitesse peut atteindre 1 m/s, ce qui améliore les échanges et permet de réduire les sections, ainsi que les dimensions du radiateur.

#### IV.10.7 Refroidissement « eau /radiateur »

Le radiateur doit présenter la plus grande surface possible pour que le refroidissement de l'eau soit efficace. Il est constitué par des tubes entre lesquels passe l'air aspiré par le ventilateur (fig. 13). L'eau circule du réservoir supérieur au réservoir inférieur.

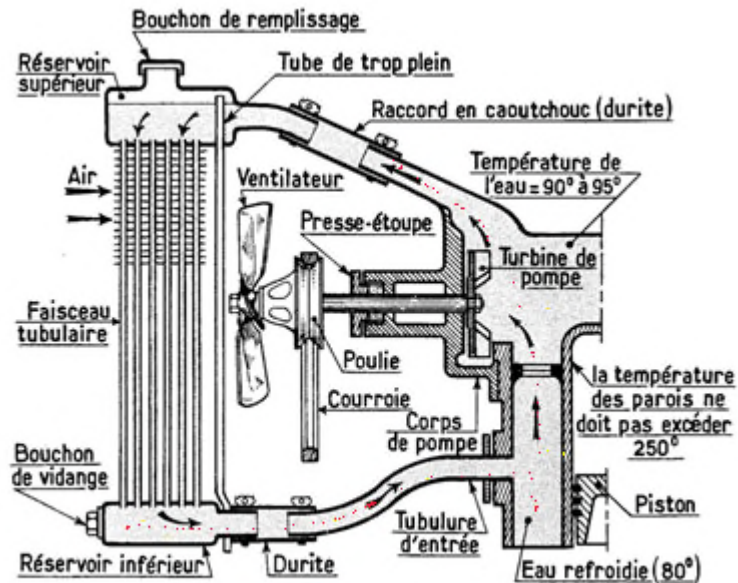


Fig.13

#### IV.10.8 Types de radiateurs

##### a. Radiateur tubulaire

Des tubes fins en métal très bon conducteur (cuivre ou laiton) relient les deux réservoirs. L'eau circule à l'intérieur des tubes, l'air à l'extérieur.

##### b. Radiateur à ailettes

Des ailettes sont soudées aux tubes et augmentent la surface de refroidissement.

##### c. Radiateur nid d'abeilles

Le faisceau de tubes est disposé horizontalement. L'air circule à l'intérieur des tubes, l'eau à l'extérieur.

La largeur de la section de passage de l'eau est de 1 à 2,5 mm (fig. 14).

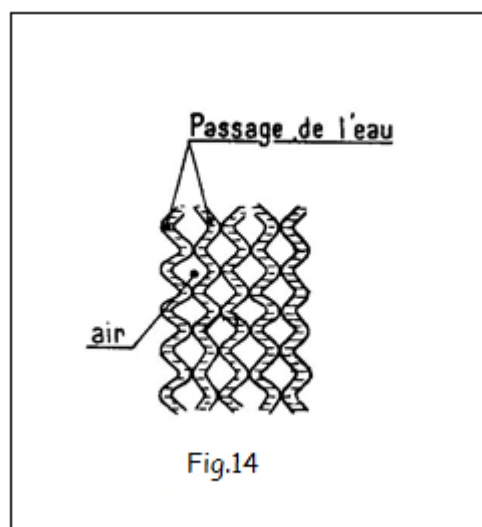
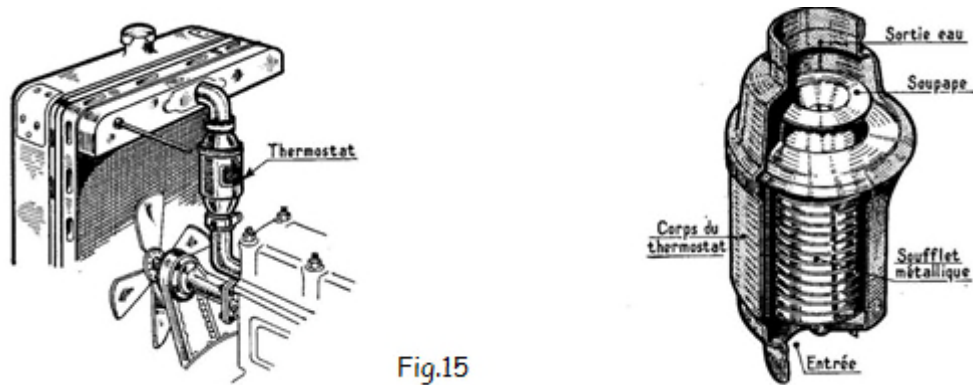


Fig.14

A noter que la température et la pression ambiante influent sur le refroidissement. En hiver, à la mise en route, le refroidissement est sans objet, puisque les organes sont à basse température. Pour accélérer la mise en mouvement du lubrifiant trop visqueux, la circulation d'eau est suspendue: un obturateur à soupape est commandé par un soufflet métallique qui se dilate sous l'action de la chaleur et provoque ainsi progressivement l'ouverture de la soupape, ce qui rétablit la circulation. Ce dispositif constitue un « thermostat » (fig.15). A haute altitude, la pression atmosphérique est plus faible et l'eau bout à une température inférieure à 100°. Il faut donc veiller à faire le plein du radiateur plus souvent.



## Chapitre V : Moteur à injection

**V.1 Introduction**

Le moteur à essence ordinaire fonctionnant selon le cycle Beau de Rochas présente des inconvénients. Donc pour avoir un bon rendement il faut augmenter le taux de compression; or, on sait que, malgré l'addition de produits antidétonants, on ne peut dépasser un taux de 7 à 8; l'essence provient d'un raffinage poussé, et qui, de plus, est volatile; son prix de revient est donc élevé, elle est délicate à stocker et à manipuler, le moteur fonctionne la plupart du temps à un taux de compression inférieur à celui prévu, car le taux de remplissage des cylindres reste voisin de 0,5 à 0,8, tant que le volet des gaz n'est pas complètement ouvert c.à.d. que le rendement aux basses allures est médiocre et enfin, Les recherches de Diesel visaient à utiliser le charbon pulvérisé directement dans le cylindre, mais si l'on n'a pas réussi à construire de moteur industriel alimenté au charbon, le cycle imaginé par Diesel a permis la mise au point du moteur à injection.

Ce moteur à injection (fig.1) permet l'utilisation de combustibles de qualité inférieure tels que le gas-oil ou huile lourde, très visqueux, peu volatils, et relativement bon marché. Le combustible n'est pas introduit en même temps que l'air, mais injecté après la compression. On peut donc utiliser un taux de compression de 15 à 18 sans risque d'auto-allumage ou de détonation. L'air s'échauffe alors à une température d'environ 600°; à ce moment seulement, le combustible est introduit dans le cylindre où il s'enflamme spontanément.

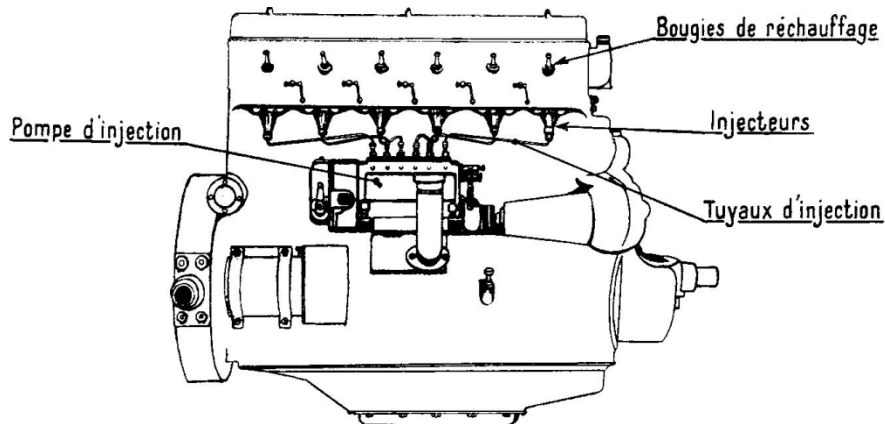


Fig. 1

**V.2 Cycle diesel théorique à quatre temps (fig.6)****- Temps admission (fig. 2)**

Le piston part du PMH et descend; l'orifice d'admission est ouvert, de l'air pur vient remplir le cylindre, puis l'orifice d'admission se referme quand le piston atteint le PMB.

**- Compression (fig. 3)**

Le piston remonte. L'air pur est comprimé sans que la chaleur produite ait le temps de s'évacuer; la température s'élève jusqu'à 600° environ et la pression atteint 20 à 25 kg:cm<sup>2</sup> en fin de compression.

**V.3 Cycle diesel pratique (fig.7)**

Le cycle pratique diffère du cycle théorique, car les ouvertures et les fermetures des orifices de distribution ne s'effectuent pas exactement aux points morts, mais sont plus ou moins décalées. Ces réglages sont en tous points comparables à ceux du moteur à explosion. L'injection commence avant le PMH pour tenir compte du délai qui sépare l'arrivée de l'inflammation du gas-oil dans le cylindre.

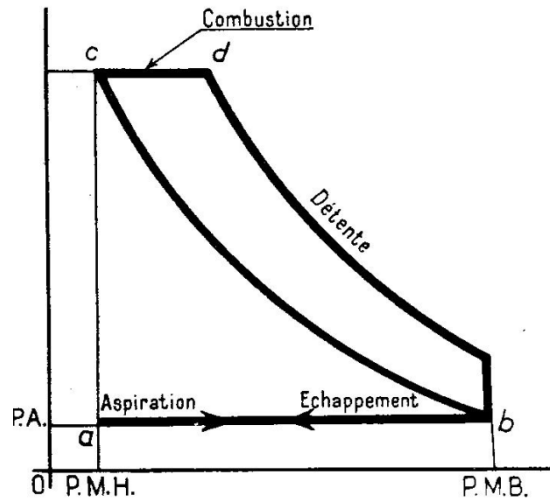


Fig. 6



Fig. 2

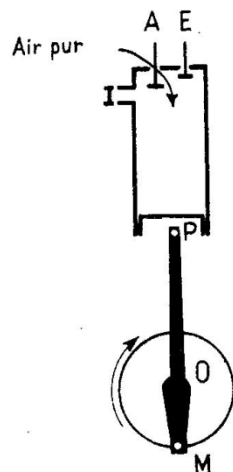


Fig. 3

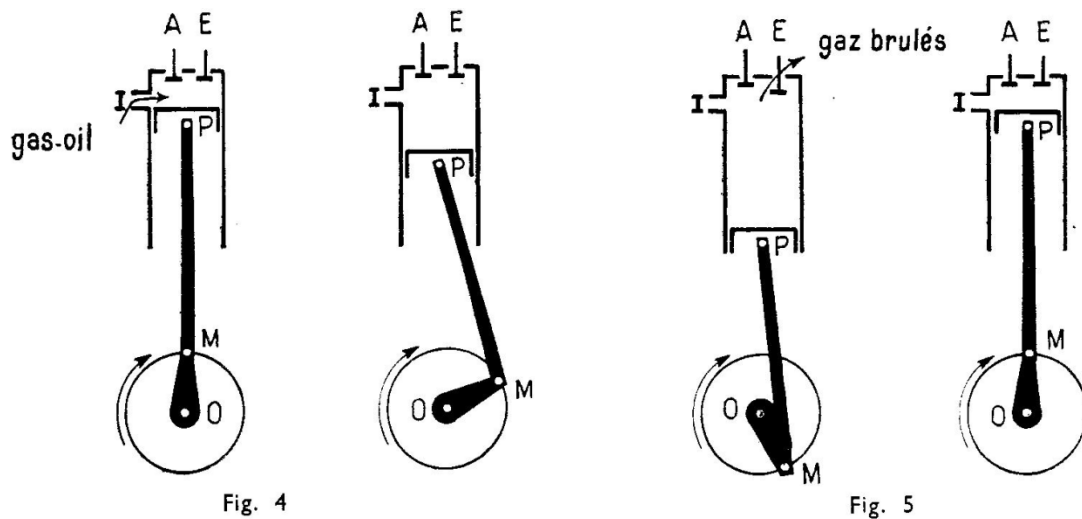


**V.3.1 Injection et détente (fig. 4)**

Le piston quittant le PMH pour redescendre, le combustible est injecté finement pulvérisé. Comme sa température d'inflammation est voisine de 300°, il s'enflamme spontanément à mesure qu'il est introduit et brûle pendant une partie de la course de descente. Ceci maintient la pression à une valeur élevée, malgré l'augmentation de volume due à la descente du piston. Le vilebrequin reçoit de l'énergie durant toute cette course : c'est le temps moteur.

**V.3.2 Échappement (fig. 5)**

Quand le piston franchit le PMB, l'orifice d'échappement s'ouvre et les gaz brûlés sont chassés par le piston qui remonte.



**V.4 Cycle diesel pratique (fig. 7)**

Le cycle pratique diffère du cycle théorique, car les ouvertures et les fermetures des orifices distribution ne s'effectuent pas exactement aux points morts, mais sont plus ou moins décalées. Ces réglages sont en tout point comparable à ceux du moteur à explosion. L'injection commence avant le PMH pour tenir compte du délai qui sépare l'arrivée de l'inflammation du gas-oil dans le cylindre.

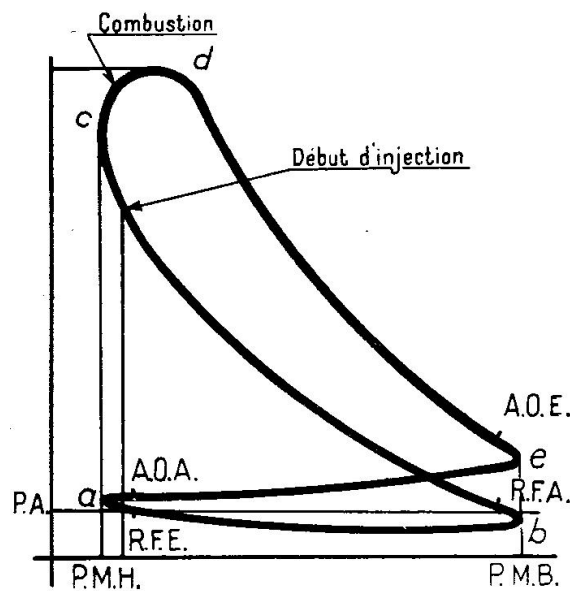


Fig. 7

**V.4.1 Avantages du moteur diésel**

Le moteur Diesel fournit de l'énergie mécanique meilleure marché que le moteur à explosion pour plusieurs raisons :

- Le rendement est élevé : la consommation par cheval-heure est en moyenne de 180 g de gas-oil au lieu de 230 g d'essence dans un moteur à explosion.
- Ce rendement se conserve à toutes les allures, puisque le taux de compression reste constant.

- Le combustible employé est relativement bon marché.

#### **V.4.2 Inconvénients**

- Les organes du moteur sont soumis à des températures élevées et à des efforts considérables, si bien que la construction du moteur pose des problèmes plus complexes que pour un moteur à explosion.
- Les hautes températures sont indispensables pour enflammer spontanément le carburant injecté.
- les pièces sont largement calculées : la construction est lourde;
- l'étanchéité entre piston et cylindre, difficile à réaliser, conduit à disposer 5 à 6 segments;
- le refroidissement doit être excellent pour assurer une bonne tenue des métaux et du lubrifiant (la jupe de piston et les segments sont allongés afin de faciliter l'évacuation de la chaleur vers le cylindre);
- le graissage est délicat en raison des hautes températures atteintes.

#### **V.4.3 Principe du moteur diésel**

Le moteur Diesel ne possède ni carburateur, ni système d'allumage, mais chaque cylindre possède un système d'alimentation propre qui comprend:

- un injecteur;
- une pompe à injection.

L'adaptation du moteur aux différentes charges s'effectue en modifiant le débit de la pompe à injection, chaque cylindre recevant toujours la même quantité d'air, mais des quantités de combustible variables : la régulation est dite : qualitative.

### **V.5 Injecteur**

#### **V.5.1 Rôle (fig. 8, 9 et 10)**

Le rôle de l'injecteur consiste à livrer un passage au combustible dans le cylindre et assurer la pulvérisation du gas-oil en vue de son mélange intime avec l'air comburant comprimé. Dans un corps cylindrique, une aiguille agit à la manière d'une soupape à commande automatique. Au repos, l'aiguille maintenue sur son siège par un ressort puissant bouche les orifices de sortie du combustible.

Quand la pompe à injection agit, la force due à la pression du combustible devient supérieure à l'action du ressort; l'aiguille se soulève et laisse passer le combustible : c'est le début de l'injection. Dès que la pression du combustible tombe au-dessous d'une certaine valeur, l'aiguille descend sous l'action du ressort, obture les orifices, et l'injection est terminée.



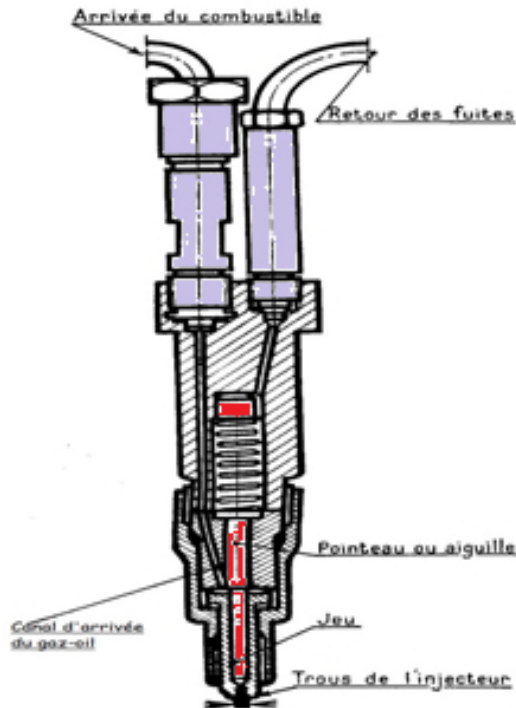


Fig.8

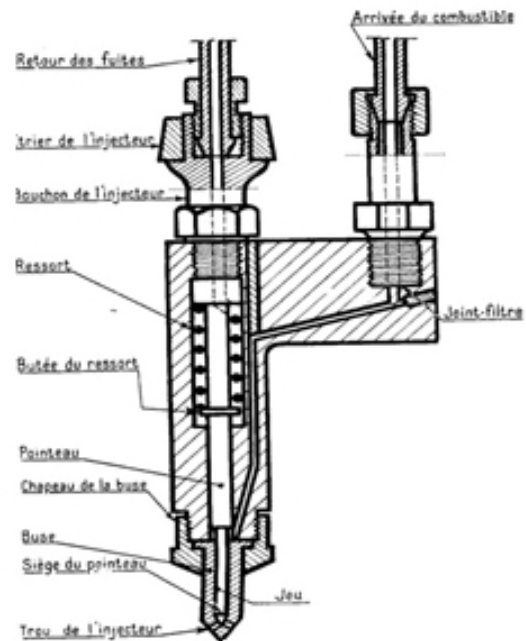


Fig.9

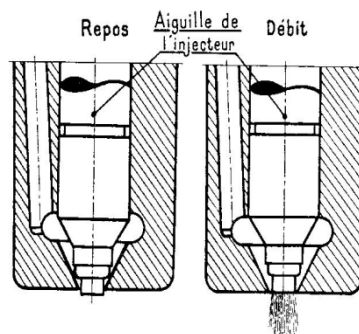


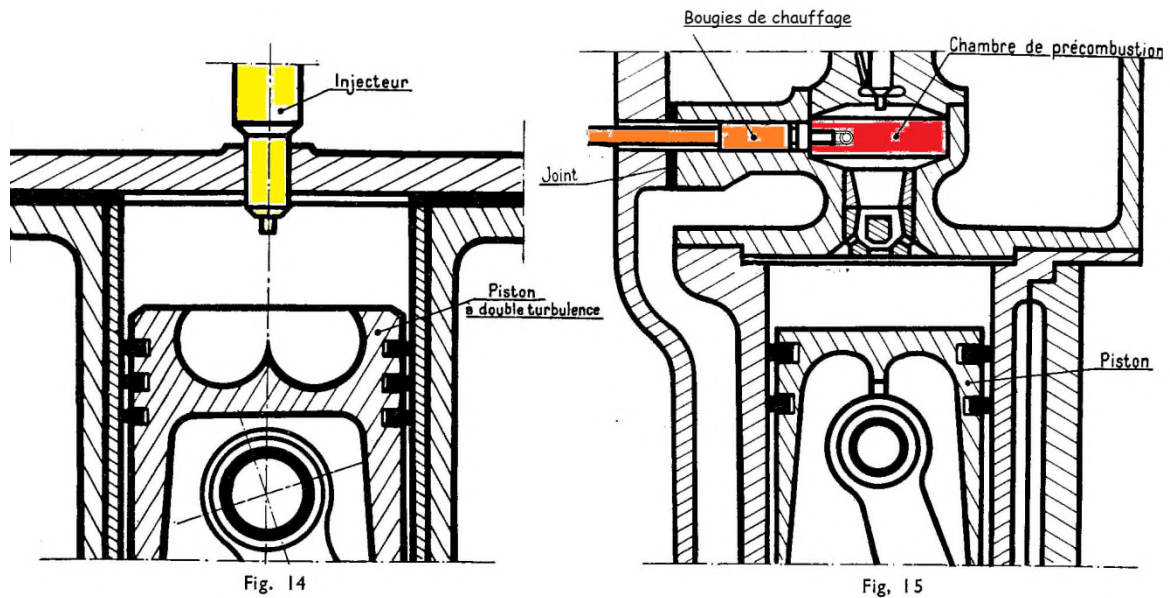
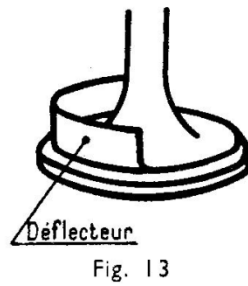
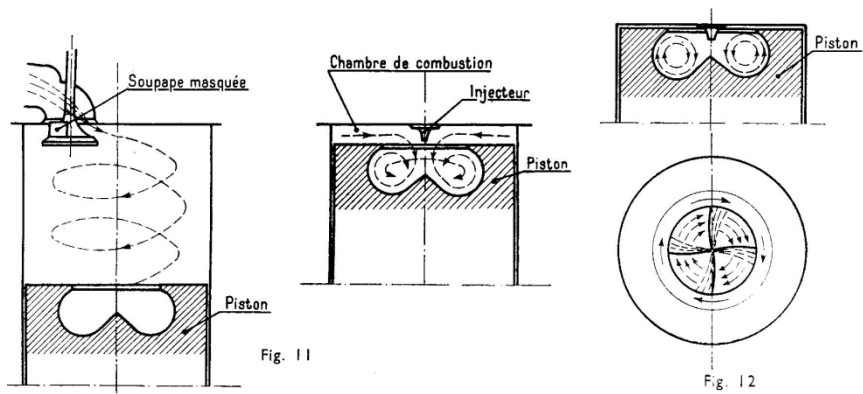
Fig. 10

### V.5.2 Mélange combustible/ comburant.

Il faut obtenir une pulvérisation du combustible à la sortie de l'injecteur et réaliser un brassage énergétique de l'air comprimé. Pour cela, il faut que :

- La position de l'injecteur soit placée à l'endroit le plus chaud de la culasse pour maintenir le combustible à injecter à la température maxima : sa viscosité est ainsi diminuée, ce qui permet d'obtenir une division très fine.
- Les orifices d'injection, ils ont prévu un ou plusieurs trous de petit diamètre, car la pulvérisation est d'autant plus facile que les orifices sont plus petits.
- La pression d'injection sera très élevée, pour dépasser la pression de 40 à 50 kg /cm<sup>2</sup> qui règne dans le cylindre et pour doter le fluide d'une grande vitesse de sortie, ce qui favorise sa pénétration et sa dispersion au sein de l'air comburant; on injecte couramment sous une pression 150 à 500 kg/cm<sup>2</sup>.

- Les formes du piston et de la soupape d'échappement, peuvent être munies d'un masque ou déflecteur qui provoque une turbulence (simple ou double) pendant la compression. Les tourbillons ne s'arrêtent pas instantanément, ils s'accroissent au contraire à mesure que le volume diminue et se poursuivent pendant toute la durée de l'injection (fig. 11, 12 et 13).



## V.6 Types d'injection

### V.6.1 Injection directe (fig. 14)

L'injecteur débouche directement dans la chambre de compression et possède plusieurs orifices (injecteur à trous). La pression d'injection est très élevée (200 à 500 kg/cm<sup>2</sup>); la turbulence peut être simple ou double.

### V.6.2 Moteur à chambre de précombustion (fig. 15)

L'injecteur est situé dans une petite chambre, non refroidie, en communication avec le haut du cylindre par un ou plusieurs orifices de passage restreint.

#### V.6.2.1 Principe de fonctionnement

L'air est comprimé à la fois dans le cylindre et dans la chambre de précombustion, mais dans cette dernière, la température moyenne demeure plus élevée puisqu'elle n'est pas refroidie; elle peut, sans inconvénient, rester à haute température, car elle ne contient aucun organe à lubrifier.

Il n'est donc pas nécessaire de porter l'air comburant à 5 ou 600° par une forte compression, car dans la chambre de précombustion, les parois se chargent d'apporter une partie de la chaleur nécessaire à une élévation de température suffisante. Un taux de compression de 10 à 12 suffit; la température atteint 350 à 400° dans la chambre de combustion. Donc, dans la chambre de précombustion, la température assurant l'auto-allumage du combustible, sans mettre en jeu, dans l'ensemble du moteur, des températures ou des efforts considérables. Le mélange constitué par les gaz déjà brûlés, l'air, le combustible, reflue dans l'espace mort du cylindre au travers des orifices de communication ; un brassage s'opère avec l'air comprimé restant et la combustion se poursuit.

L'homogénéité du mélange est ici assurée par le brassage, si bien que la pulvérisation du combustible présente un intérêt plus réduit qu'en injection directe : l'injecteur présente un seul orifice dans l'axe (injecteur à téton). La pression d'injection est modérée, 80 à 90 kg/cm<sup>2</sup>, il suffit, en effet, que le combustible pénètre avec certitude dans un milieu dont la pression n'excède pas 30 à 40 kg/cm<sup>2</sup>.

### V.6.3 Moteur à réserve d'air (fig. 16 et 17)

L'injecteur est situé au passage resserré mettant en communication le haut du cylindre et une chambre de petite dimension dite réserve d'air ou chambre auxiliaire.

#### V.6.3.1 Principe de fonctionnement

L'injecteur est placé au point de la chambre de compression où la vitesse de circulation est la plus élevée; il en résulte un brassage énergique et une bonne pulvérisation au cours du mouvement que les gaz effectuent dans chaque sens au cours d'un cycle.

Dans ces deux moteurs, une bougie de réchauffage est nécessaire pour assurer l'allumage lors du démarrage, car le taux de compression adopté n'est pas suffisant pour porter l'air ambiant à une température suffisante lorsque la culasse est froide.

## V.7 Pompe à injection

### V.7.1 Rôle

La pompe à injection refoule le combustible du réservoir dans l'injecteur; il importe que la quantité de combustible envoyée à chaque cycle, soit portée à la pression d'injection nécessaire, soit introduite à un instant du cycle très précis, ou bien elle corresponde à la puissance demandée au moteur.

### V.7.2 Organes d'une pompe à injection (fig. 18):

- un cylindre, un piston, et la commande de ce dernier; 20 un dispositif de réglage du début d'injection ;
- un dispositif de réglage du débit de combustible injecté.

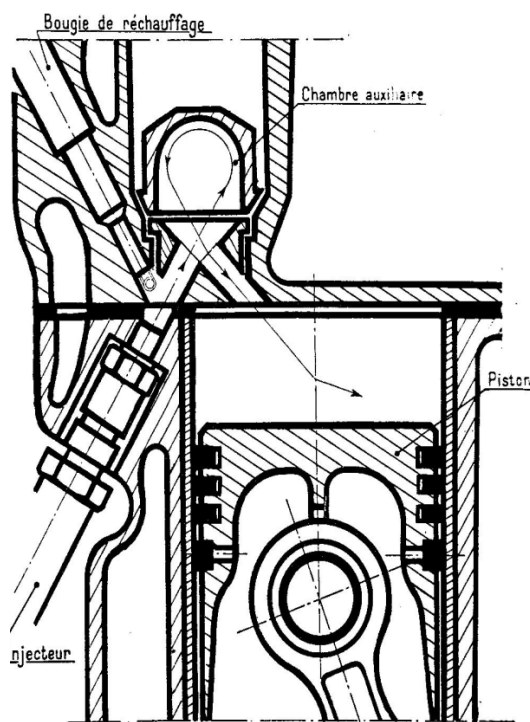


Fig. 16

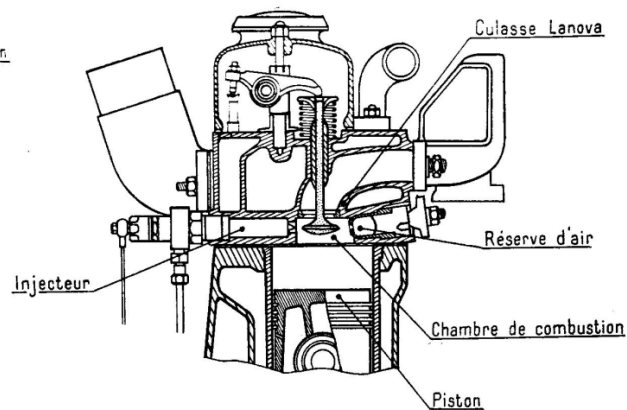


Fig. 17

L'étanchéité entre piston et cylindre s'obtient par simple ajustement ; ces pièces, usinées avec soin, traitées, rectifiées, puis appariées, sont enfin rodées mutuellement. En raison du mouvement rectiligne alternatif rapide du piston, une prompt usure s'ensuivrait si un bon graissage n'était réalisé:

- pour les moteurs à gas-oil, le graissage est automatique, le combustible étant assez visqueux pour que les fuites lubrifient la surface de contact piston-cylindre ;
- pour les moteurs à essence, il faut amener l'huile de graissage en des points de la surface de frottement sous une pression suffisante pour que le lubrifiant s'étale correctement.

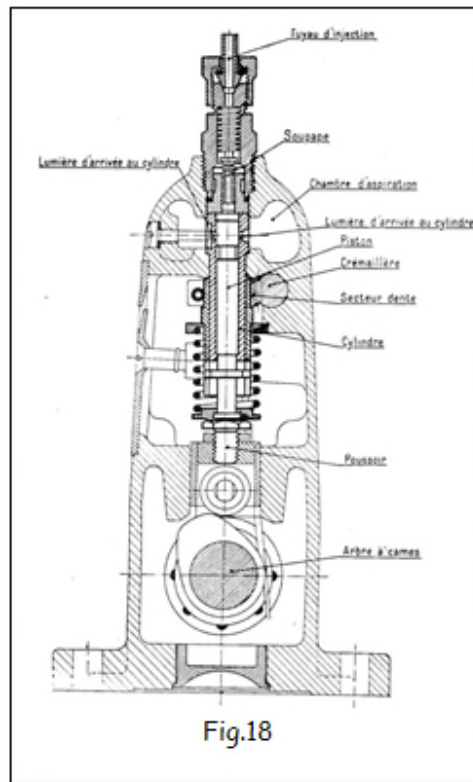


Fig.18

### V.7.3 Étude de la commande du piston

Le piston est solidaire d'un pousoir qui se meut dans le sens du refoulement sous l'action d'une came ; il est rappelé dans le sens de l'aspiration par un ressort à boudin. Les cames des pompes sont solidaires du même arbre, appelé arbre à cames d'injection. Il fait un tour pendant un cycle du moteur et par conséquent tourne à la même vitesse que l'arbre à cames de distribution.

### V.7.4 Réglage du début d'injection

L'arbre à cames d'injection entraîne chaque came par une rainure hélicoïdale : un déplacement axial de la came provoque son décalage angulaire par rapport à l'arbre et permet ainsi l'avance ou le retard à l'injection désiré.

#### V.7.4.1 Dosage du débit

#### V.7.4.2 Dosage en poids

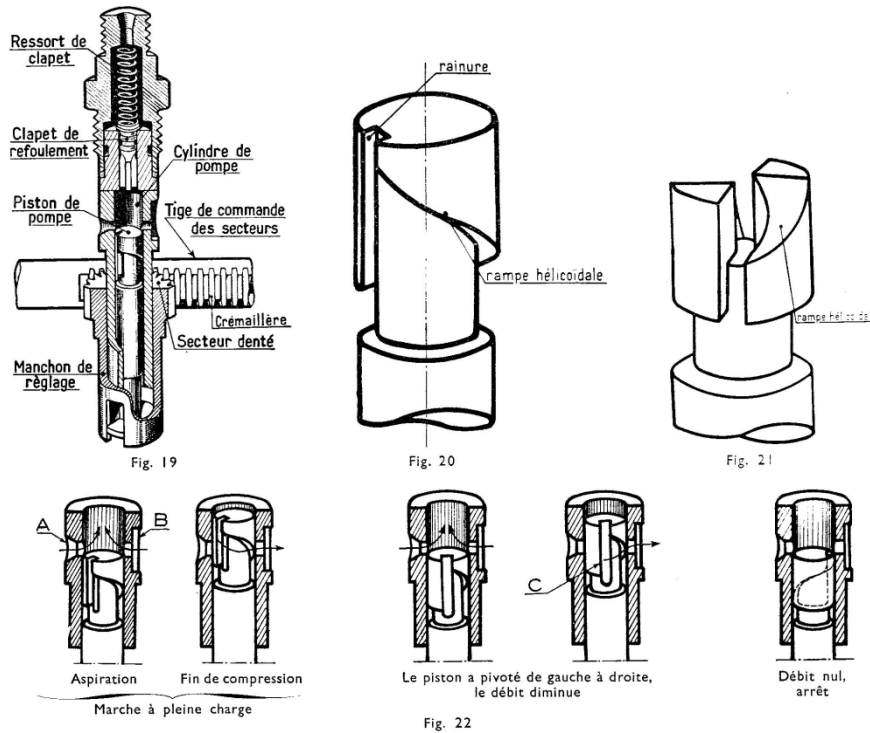
Un mélange normal exige un poids d'air valant 15 fois le poids de combustible : à 0,1 g ce correspond 1,5 g d'air, soit 1,15 dm<sup>3</sup> environ.

#### V.7.4.3 Dosage en volume

Pour un moteur monocylindrique de 1,15 dm<sup>3</sup> de cylindrée, il faut injecter 0,1 g de gas-oil ayant une densité voisine de 0,85, ce qui correspond à 0,120 cm<sup>3</sup> de combustible à chaque cycle.

Cette valeur correspond à la marche du moteur à la puissance maxima, mais, en fait, il est rare qu'un moteur soit constamment utilisé à pleine charge. En marche réduite ou au ralenti, on peut réduire le volume de combustible injecté au cinquième de sa valeur maxima, soit 24 mm<sup>3</sup> au lieu de 120 mm<sup>3</sup>.

Le réglage du volume refoulé par la pompe s'effectue en agissant sur la position angulaire du piston (fig. 19); ce dernier porte une rainure hélicoïdale (fig. 20 et 21) conduisant le combustible vers un orifice du cylindre de la pompe. La rotation du piston et de la rainure provoque un retard ou une avance dans l'obturation de cet orifice, le débit du combustible se trouve augmenté ou diminué (fig. 22).



## Chapitre VI : combustibles pour les moteurs à combustion interne

Les combustibles le plus fréquemment employés se présentent à l'état liquide; ce sont, à l'exception des alcools, des mélanges de carbures d'hydrogène (carbone et hydrogène).

### VI.1 Caractéristiques des combustibles

On apprécie dans un combustible diverses qualités :

- le pouvoir calorifique, quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de masse, caractérise l'aptitude du carburant à porter à haute pression et à haute température l'air comprimé dans le cylindre;
- le poids spécifique, et le volume d'air, nécessaire pour brûler l'unité de masse du combustible, interviennent dans le choix des éléments de réglage du carburateur afin d'obtenir un dosage correct;
- la tendance à la détonation caractérise l'aptitude du carburant à exploser spontanément lorsque le piston comprime le mélange carburé. il recherche, pour les moteurs poussés, des combustibles antidétonants.

Le tableau suivant expose les qualités des combustibles liquides usuels :

| Combustible    | Pouvoir calorifique en kcal/kg | Poids spécifique en g/cni <sup>3</sup> | Volume d'air en m <sup>3</sup> pour brûler 1 kg de combustible | Tendance à la détonation |
|----------------|--------------------------------|--|--|--------------------------|
| <b>Essence</b> | 10 000 à 12 000                | 0,680 à 0,720                          | 13 à 15  | dépend de sa composition |
| <b>Alcool</b>  | 6 000 à 7 000                  | 0,800                                  | 7,5 à 9  | néant                    |
| <b>Benzol</b>  | 10 000                         | 0,885                                  | 11,6 à 13,8  | faible                   |
| <b>Gas-oil</b> | 9 800 à 10 700                 | 0,850                                  | 11,5 à 13,5  | dépend de sa composition |

### VI.2 Origine et utilisation des combustibles

L'importance du pétrole apparaît dans le tableau ci-dessous :

| Combustible                     | Origines   | Particularités   |
|---------------------------------|--|--|
| <b>Essence</b><br><b>Alcool</b> | — distillation des pétroles bruts;<br>— hydrogénation de la houille (essence synthétique). | Grande volatilité — permet des départs assez faciles.  |
| <b>Benzol</b>                   | — distillation de produits végétaux (vin, pomme de terre, grains, etc.).                   | S'hydrate facilement — rend les départs difficiles — mélangé avec l'essence, améliore la résistance à la détonation.   |
| <b>Gas-oil</b>                  | — distillation des goudrons de houille.<br>— distillation des pétroles bruts.              | Gèle à — 4° — départs à froid difficiles —rarement employé seul — entre dans la composition du supercarburant (alcool, benzo, essence).Peu volatil — est injecté sous forte pression dans les cylindres. |

### VI.3 Pétrole brut ou naphte

Sous sa forme naturelle, le pétrole est un liquide noir et visqueux qui se trouve dans le sol à des profondeurs variables (200 à 2 000 m). Les principaux gisements de pétrole existent aux États-Unis, en Union Soviétique, en Algérie, au Vénézuéla, au Moyen-Orient, au Mexique et en Roumanie. Après extraction, le pétrole brut est traité pour en tirer différents produits d'utilisation industrielle.

#### VI.3.1 Traitement du pétrole brut

Ce traitement varie avec la composition du naphte.

#### VI.3.2 Distillation

Par distillation fractionnée les produits se séparent dans l'ordre décroissant de volatilité; le tableau suivant indique leurs caractéristiques principales.

| Désignation             | Poids spécifique en g/cm <sup>3</sup> | Température d'ébullition | Utilisation           |
|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| - Éther de pétrole.     | 0,660                                 | 45° à 70°                | solvant               |
| - Essence pour moteur   | 0,70 à 0,75                           | 70° à 150°               | carburant usuel       |
| - Pétrole lampant       | 0,76 à 0,80                           | 150° à 280°              | moteurs marins        |
| - Huiles à gaz (gasoil) | 0,83                                  | 290° à 330° <sup>0</sup> | moteurs Diesel        |
| - Huiles de graissage   | 0,90 à 0,92                           | 330° à 380°              | graissage des moteurs |

Après huile de graissage l'opération de traitement s'arrête et le résidu obtenu est un liquide utilisable dans les foyers de chaudières, appelé fuel-oil ou mazout.

L'opération de la distillation se poursuit, pour obtenir :

La paraffine, qui sert d'isolant, et rentre également dans la fabrication des papiers et des toiles cirées; les goudrons qui sont utilisés pour la réfection des toitures et des chaussées. Le résidu final est le coke de pétrole, charbon pur utilisé en électricité pour la fabrication des électrodes.

#### VI.3.3 Raffinage

L'essence obtenue pour moteur peut encore être fractionnée en essence très légère pour les moteurs d'avions, en essence de tourisme, et en essence pour les poids lourds.

#### VI.3.4 Cracking ou craquage des pétroles

De tous les dérivés du pétrole l'essence et le gas-oil sont les plus utilisés; or, pour certains gisements, leur pourcentage dans le pétrole brut est faible, et il arrive même qu'un naphte ne contienne que des huiles lourdes. Pour augmenter le rendement en carbures légers (essence), on procède à un traitement chimique appelé « cracking ».

L'opération porte sur le résidu restant après le gas-oil : on le chauffe au-dessus de 300°, ce qui produit une décomposition des huiles en carbures d'hydrogène légers : essence et gaz, et en produits plus lourds : coke et goudron. Les essences ainsi obtenues, appelées «essences de cracking» ont peu de tendance à la détonation, mais forment des gommages au cours du stockage.



### ***VI.3.5 Combustibles gazeux***

Pour mémoire, il convient de citer les combustibles gazeux utilisés comme carburants de remplacement : le gaz de haut fourneau, le gaz de ville, le gaz de gazogène, l'acétylène, l'hydrogène.

## Chapitre VII : Puissance d'un moteur CI

Un moteur est défini par un certain nombre de caractéristiques géométriques et mécaniques :

- la cylindrée, calculée en fonction :
  - l'alésage, de la course,
  - du nombre de cylindres;
- la vitesse de rotation, en tours par minute, au régime maximum et la puissance à ce régime mesurée au banc d'essai.

La désignation d'un moteur ou d'un véhicule est complétée par l'indication de sa puissance fiscale.

### VII.1 Puissance fiscale

Elle est déterminée suivant une formule établie par le Service des Mines

$$P = knD^2 LW \quad (1)$$

- $P$  : désigne la puissance fiscale en chevaux-vapeur ( $ch$ );
- $k$  : coefficient numérique dépendant du nombre de cylindres :

|                          |                |
|--------------------------|----------------|
| 1 cylinder .....         | $k = 0,00020,$ |
| 2 cylindres.....         | $k = 0,00017,$ |
| 4 cylindres.....         | $k = 0,00015,$ |
| Plus de 4 cylindres..... | $k = 0,00013.$ |

- $n$  : nombre de cylindres du moteur;  $D$  : alésage du cylindre exprimée en  $cm$ ;
- $L$  : course du piston exprimée en  $cm$ ;
- $w$  : nombre de tours par seconde, fixé conventionnellement à
  - 30 t/s pour les voitures de tourisme,
  - 25 t/s                   « camionnettes »,
  - 20 t/s                   « camions ».

La puissance fiscale, calculée au moyen de cette formule, n'exprime donc pas la puissance réelle développée par le moteur, c'est une valeur approchée de la puissance développée à faible vitesse : par exemple, le moteur Renault dont la puissance fiscale est de 4  $ch$ , développe une puissance effective d'environ 16  $ch$  à 4 000 tr/mn.

Cette formule du Service des Mines, contient la cylindrée, «  $nD^2L$  », à un coefficient près. C'est ce qui a conduit les constructeurs à établir des moteurs de faible cylindrée, mais tournant à des vitesses élevées. Actuellement, la puissance fiscale est souvent considérée pour le calcul des primes d'assurance. Chaque série de moteur est caractérisée, en outre, par l'indication d'un type, afin de différencier les modèles :

Exemple : Moteur Renault 4  $ch$  type 662.

### VII.2 Puissance réelle

La puissance réelle, ou puissance effective, se mesure directement sur l'arbre moteur. C'est la puissance mécanique disponible sur le vilebrequin. En pratique, les dispositifs utilisés pour mesurer la puissance d'un moteur sont des freins; ces appareils sont accouplés directement sur le vilebrequin et

permettent de mesurer le couple transmis  $C$  tout en absorbant l'énergie mécanique fournie. On emploie un des moyens suivants :

- frottement mécanique (frein de Prony),
- production de courant électrique (dynamo - dynamométrique),
- frottements hydrauliques (frein Froude),
- frottements aérodynamiques (moulinet).
- Un tachymètre permet de mesurer la vitesse angulaire  $\omega$ .

La puissance  $P$  du moteur est donnée par la relation :

$$P = C\omega \quad (2)$$

Dans laquelle  $C$  s'exprime en m.kg

$$\omega : \text{en radian par seconde } \left( \omega = \frac{2\pi Nt / mn}{60} \right), \quad P : \text{ en kgm/s}$$

### VII.3 Rendement d'un moteur

Un moteur donne de l'énergie mécanique en transformant, l'énergie calorifique contenue dans le carburant, mais la transformation est incomplète car certaines pertes sont inévitables. Si, par exemple, la consommation d'une quantité d'essence équivalente à 100 calories ne donne sur l'arbre du moteur qu'une énergie mécanique correspondant à 27,5 calories, les pertes valent :

$$\ll 100 - 27,5 = 72,5 \text{ calories} \gg \quad (3)$$

#### VII.3.1 Rendement global d'un moteur

On appelle rendement net ou rendement global d'un moteur le rapport

$$r = \frac{\text{énergie recueillie sur l'arbre}}{\text{énergie contenue dans le carburant dépensé}} \quad (4)$$

Pour le moteur déjà considéré, le rendement serait :  $27.5/100 = 27.5\%$ .

#### VII.3.2 Bilan des pertes (fig.1)

Conservons le même exemple :

##### VII.3.2.1 Pertes d'échappement $P_1$

Une grande partie des pertes provient des gaz d'échappement qui sortent à une température et à une pression bien supérieures à celles de l'air aspiré, «  $P_1 = 32$  calories environ ».

##### VII.3.2.2 Pertes internes $P_2$

Les mouvements du fluide s'accompagnent de tourbillons, et le refroidissement enlève aux gaz du cylindre une partie de leur chaleur : d'où une perte interne thermique. Le mouvement du piston contre le cylindre cause une perte interne mécanique : «  $P_2 = 34$  calories environ ».

### VII.3.2.3 Pertes externes P<sub>3</sub>

Ce sont les pertes dues :

- aux mécanismes reliant le piston à la prise de mouvement en bout d'arbre : embielage, vilebrequin;
- aux mécanismes accessoires entraînés par l'arbre moteur : arbres à cames, pompe à huile, dynamo, ventilateur, etc. « P<sub>3</sub>=6.5 calories environ ».
- Au total en peut avoir une parte de 72.5 calorie pour le moteur prit en exemple.

### VII.3.2.4 Rendements partiels

Ces rendements sont définis de manière à faire apparaître dans quelle mesure le fonctionnement réel du moteur s'écarte des conditions théoriques :

#### VII.3.2.4.1 Rendement théorique r<sub>1</sub>

En traçant le cycle théorique et en mesurant la surface du diagramme, on peut connaître le travail théorique disponible quand on consomme une quantité d'essence équivalente à 100 calories.

On trouverait, par exemple, 45 calories « r<sub>1</sub>= 45/100= 45% ».

Remarquons que les pertes par échappement valent, en théorie, 55 calories, alors qu'en fait il ne trouve que 32 calories; cela tient à ce que le refroidissement énergétique auquel sont soumettre les parois diminue la température et la pression de la masse gazeuse, supprime donc une partie des pertes par échappement.

#### VII.3.2.4.2 Rendement du cycle r<sub>2</sub>

L'indicateur qui effectue le tracé du diagramme réel fournit l'énergie disponible sur le piston, ou énergie indiquée, dans ce cas ils ont pris en évidence la somme des pertes P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>.

$$32 \text{ cal} + 34 \text{ cal} = 66 \text{ cal}$$

Il reste donc :  $100 - 66 = 34 \text{ cal}$  ;

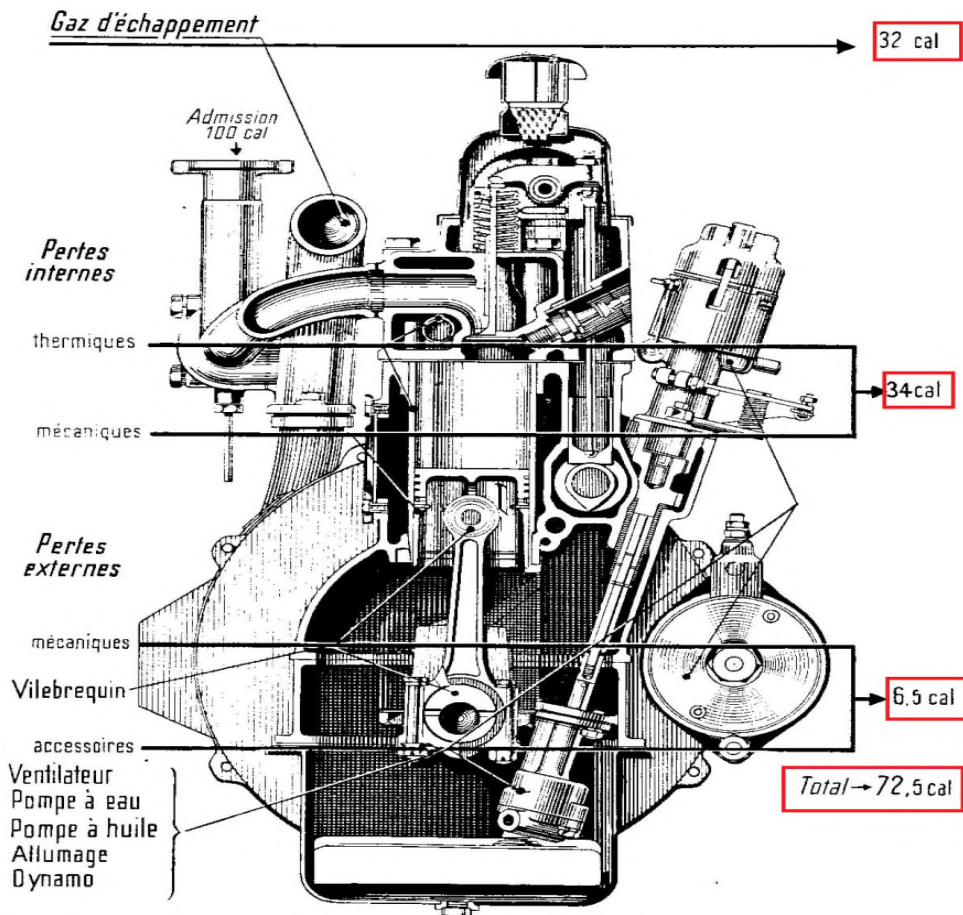
$$R_2 = 34/45 = 75.5\%$$

#### VII.3.2.4.3 Rendement mécanique r<sub>3</sub>

Les mécanismes absorbent 6,5 calories sur les 34 reçues du piston ; l'énergie disponible sur le vilebrequin n'est plus que 27,5 calories :  $r_3 = 27.5/34 = 81\%$ .

Remarque : le rendement global est les produits totaux des rendements précédents :

$$r_3 = r_1 \times r_2 \times r_3 = \frac{27.5}{34} \times \frac{34}{45} \times \frac{45}{100} \quad (5)$$



Le moteur Diesel a un rendement global supérieur au moteur à explosion : pour une consommation de gas-oil correspondant à 100 calories on trouve par exemple :

- $P_1 = 23$  calories (moins de pertes à l'échappement car la détente est plus poussée) ;
- $P_2 = 29,5$  calories (refroidissement moins énergétique car l'auto-allumage n'existe pas) ;
- $P_3 = 9,5$  calories (pertes mécaniques supérieures en raison des efforts plus importants mis en jeu).

Donc, 
$$P_1 + P_2 + P_3 = 62 \text{ calories} \quad (6)$$

Il reste :  $100 - 62 = 38$  calories d'où,  $r = 38/100 = 38\%$

1. R. Bosch. « Automotive Handbook ». 5th edition. 2002. Society of Automotive Engineers (SAE)
2. G. Ciccarelli. «Applied Combustion ». Notes de cours. Queens University.
3. M. Ehsani Y. Gao, S Gay & A. Emadi. « Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell vehicles. Fundamentals, Theory and Design ». CRC press. 2005.
4. J.B. Heywood. “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, 1988.
5. H. Mèmeteau. « Technologie fonctionnelle de l’automobile. Tome 1 Le moteur et ses auxiliaires ». 4ème édition. Dunod 2002.
6. A. Bechkok. « les moteurs à combustion interne » l’office des publications universitaires : 06/1995
7. R. Guerber. L’automobile, Tome 1 : le moteur ( techniques et vulgarisation).
8. J.Erjavec. moteur à combustion interne diagnostique et réparation. 2<sup>ème</sup> Ed. broché 2015
9. H.mémetaux, technologie fonctionnelle de l’automobile – tome1 7eme ed. : le moteur et ses auxilliaires.2014.
- 10.S. Robert. J. Payen, Les moteurs à combustion interne. Grands Classiques des Sciences et des Techniques . Revue d'histoire des sciences et de leurs applications, tome 22, n°1, 1969. pp. 87-88.