

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المسيلة : 2022/10/20



جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة الميكانيكية

### شهادة إدارية ( خاصة بتقييم مطبوعة جامعية )

إن رئيس اللجنة العلمية لقسم الهندسة الميكانيكية بكلية التكنولوجيا يشهد بأن :  
الأستاذ : زرقان السعيد الرتبة : أستاذ محاضر - أ -

قام بإنجاز مطبوعة محاضرات خاصة بالمادة : Moteurs à Combustion Interne  
حسب البرنامج الدراسي لطلبة الماستر I  
شعبة: بناءات ميكانيكية  
وهذا بناءا على التقارير الإيجابية للجنة الخبراء التي قامت بتقييم المطبوعة .

رئيس اللجنة العلمية



**Résumé :**

Ce polycopié de cours sur les moteurs à combustion interne est destiné aux étudiants de 1ère année de Master, spécialité construction mécanique, et suit le programme établi par le Comité Pédagogique National des Sciences et Technologies (CPNDST). Il a été élaboré à partir de divers ouvrages et documents traitant des moteurs thermiques, qu'ils soient à essence ou Diesel.

Complémentaire au module de moteur à combustion interne dispensé aux étudiants de 3ème année de Licence LMD, option construction mécanique, ce polycopié se concentre principalement sur le fonctionnement des éléments périphériques au moteur à combustion interne, au-delà du bloc moteur. Il aborde également la chaîne cinématique qui transmet le mouvement de l'arbre principal jusqu'aux roues, le concept de suralimentation, les anomalies de la combustion, ainsi que les normes visant à réduire les émissions polluantes des moteurs. Les exemples et exercices présentés ont été soigneusement sélectionnés pour faciliter la compréhension et la maîtrise des concepts liés au module des moteurs à combustion interne.

**Mots clés :**

Moteur à combustion interne, chaîne cinématique, auxiliaires fonctionnel, modes de combustion, suralimentation, turbocompresseur, normes de pollution, indice d'octane, indice de cétone

République Algérienne Démocratique et  
Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf- Msila

Faculté de technologie

Département de Mécanique



# **MOTEURS A COMUSTION**

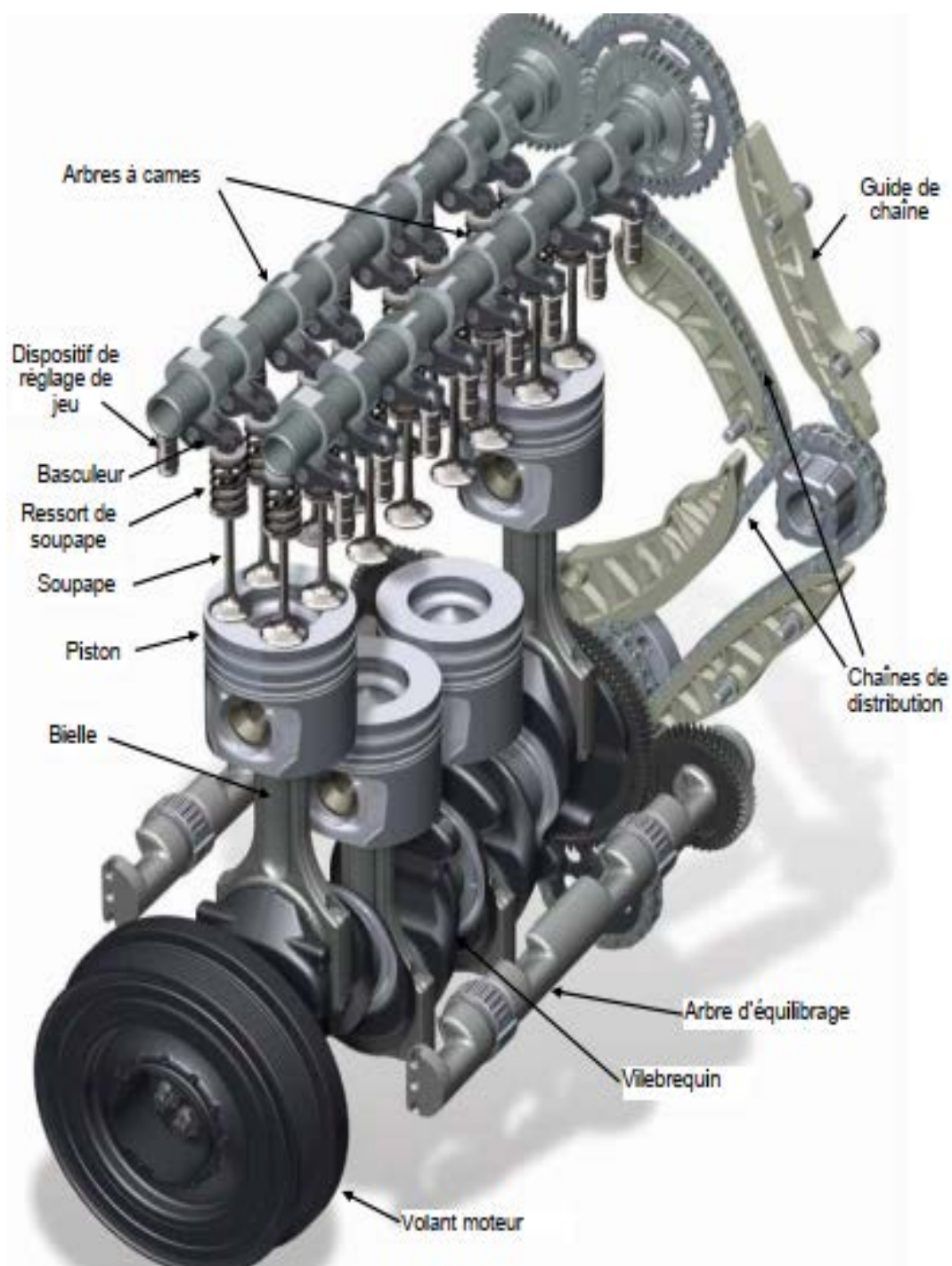
## **INTERNE**

Polycopié de cours destiné aux étudiants de

Construction Mécanique

Master 1 – L M D

Elaboré par Dr. Zergane Said



## Préface

Le travail présenté sous forme de polycopié, est un support de cours sur les moteurs à combustion interne, il est élaboré selon le programme officiel proposé aux étudiants de première année master LMD, option construction mécanique. Ce document a pour objectif ; fournir une description du fonctionnement réel des moteurs à combustion interne, ainsi que les principes du calcul de leurs performances et de leur dimensionnement de base. Il complète les notions fondamentales enseignées dans la troisième année licence de la même option par des chapitres détaillés sur les cycles thermodynamiques, les chaînes cinématiques principales et auxiliaires et les paramètres liés à la combustion. Pour approfondir les notions sur les moteurs à combustion interne, des exemples et des exercices ont été proposés avec leurs corrections.

Ce polycopié est structuré en huit chapitres comme suit :

**Le premier chapitre** aborde l'analyse organique et la description des différents cycles thermodynamiques liées aux moteurs à combustion interne en survolant les généralités pré-requises.

**Le deuxième chapitre** présente les chaînes principales et auxiliaires nécessaires au fonctionnement du moteur et entraînées par l'arbre principale, du vilebrequin aux roues motrices.

**Le troisième chapitre** illustre les différents cycles thermodynamiques théoriques, à savoir Beau de Rochas, Diesel et mixte avec une comparaison avec celles du réelles, ainsi que les effets pariétaux, flux d'énergie qui se déroulent dans la chambre de combustion. Egalement la méthode de calcul des paramètres indiqués et effectifs ont présentés.

**Le quatrième chapitre** présente les respirations liées aux moteurs à combustion interne modes opératoires, aspiration et suralimentation

**Le cinquième chapitre** est dédié au phénomène du frottement ; causes, effets, conséquences et les méthodes de réduction des effets de ce phénomène. L'architecture générale et les dimensions principales ont été abordées avec la description des deux parties composantes du moteur ; parties fixes et parties mobiles

**Le sixième chapitre** traite d'une manière générale les notions fondamentales liées aux carburants liquides et gazeux, ainsi que l'indice de cétane et d'octane selon les normes

internationales. Egalement, les modes de combustion, les types de carburant et el pouvoir calorifique du combustible ont été abordés.

**Le septième chapitre** regroupe les problèmes et les anomalies pratiques rencontrés durant la combustion et comment avoir une réaction de combustion complète par l'optimisation complète des lois qui les régissent.

**Le huitième chapitre** est consacré à la technologie utilisée dans l'alimentation des moteurs à combustion interne en carburant pour avoir un rendement important qui nous permet de réduire les émissions polluantes.

# Tables de matières

## Chapitre I

Analyse organique, thermodynamique et mécanique générale	01
I.1 Généralités sur les moteurs à combustion interne	01
I.1.1. Définition	01
I.1.2. Comparaison entre le fonctionnement des moteurs	02
I.1.3. Cycles théoriques d'un moteur à combustion interne	02
I.1.3.1. Cycle d'un moteur à allumage commandé	03
I.1.3.2. Cycle d'un moteur Diesel	04
I.1.3.3. Cycle Sabathe (Seilliger)	05
I.2. Bilan énergétique	05
I.2.1. Cycle de Beau de Rochas	06
I.2.2. Cycle Diesel	06
I.3. Analyse organique	06
I.3.1. Définition	07
I.3.2. Analyse organique élémentaire	07
I.3.3. Analyse Fonctionnelles	07
I.4. Exercices corrigés	08

## Chapitre II

Chaînes cinématique principale et auxiliaires fonctionnels	11
II.1. Chaîne cinématique principale	11
II.1.1. Définition	11
II.1.2. Rôles des organes de la chaîne cinématique	11
II.2. Auxiliaires fonctionnels	14
II.2.1. Système d'allumage	15
II.2.2. Système d'alimentation en carburant	16
II.2.3. Système de refroidissement	17
II.2.4. Système de lubrification	18
II.2.5. Système de distribution	19
II.2.6. système d'échappement	20

II.3. Exercice corrigés	21
-------------------------	----

### **Chapitre III**

Cycles thermodynamiques, effets pariétaux, flux d'énergie	23
III.1. Cycles thermodynamiques réels	23
III.2. Paramètres indiqués et paramètres effectifs	25
III.3. Transfert thermique pariétal et flux de chaleur	26
III.4. Exercices corrigés	26

### **Chapitre IV**

Respiration ; modes opératoires, aspiration et suralimentation	30
IV.1. Aspiration dans un moteur à combustion interne	30
IV.1.1. Aspiration dans un moteur à essence	30
IV.1.2. Aspiration dans un moteur Diesel	30
IV.2. Utilité d'un mode de respiration plus performant	30
IV.3. Suralimentation d'un moteur	31
IV.3.1. différents types de suralimentation	31
IV.3.1.1. Le turbocompresseur	31
IV.4. suralimentation refroidie	35

### **Chapitre V**

Frottement, architecture générales, dimensions principale	36
V.1. Frottement	36
V.1.1. Réduire l'effet du frottement	37
V.2. Architecture générale	37
V.2.1. composition d'un moteur à combustion interne	38
V.3. Dimensions principales	38
V.4. Exercices corrigés	39

### **Chapitre VI**

Propriétés du combustible et étude des modes de combustion	42
Introduction	42
VI.1. Indices caractérisant le type de moteur	42
VI.1.1. Indice de cétane pour les moteurs Diesel	43
VI.1.2. Indice de cétane pour les moteurs à essence	43

VI.2. Amélioration des indices d'octane	44
VI.3. Modes de combustion	44
VI.3.1. Moteur à allumage commandé	44
VI.3.2. Moteur à allumage par compression	45
VI.3.3. Moteur à charge stratifiée	45
VI.3.4 Moteur à Duel fuel	46
VI.4. Phénomène de cliquetis	47
VI.5. Exercices corrigés	48
<b>Chapitre VII</b>	
Etude des anomalies et optimisation des lois de combustion	50
VII.1. Etude des anomalies	50
VII.2. Optimisation des lois de combustion	51
VII.3. Exercices corrigés	52
<b>Chapitre VIII</b>	
Technologies d'alimentation et maîtrise des émissions polluantes	55
VIII.1. Technologies d'alimentation	55
VIII.1.1. dans les moteurs à essence	55
VIII.1.2. dans les moteurs Diesel	56
VIII.2. Pollution de l'air par l'émission des moteurs thermiques	58
VIII.2.1. Réduction de la pollution en provenance des moteurs thermiques	59
VIII.2.1.1. Réduction des émissions à la source	59
VIII.2.1.2. Traitement catalytique des gaz d'échappement	60
VIII.3. Exercices corrigés	62
Références bibliographiques	64

## Chapitre I : Analyse organique, thermodynamique et mécanique générale

### I.1. Généralités sur les moteurs à combustion interne

#### I.1.1. Définition

Le moteur à combustion interne est une machine qui transforme l'énergie chimique contenue dans un carburant, en énergie calorifique libérée par la combustion du combustible puis en énergie motrice mécanique. Cette transformation est effectuée au cours d'un cycle moteur qui représente un processus physico-chimique complexe se répétant périodiquement dans le cylindre du moteur sur 4 opérations : Admission, compression, inflammation, détente et échappement. Généralement dans les moteurs à combustion interne, on distingue à pistons alternatifs ou rotatifs, Diesel ou à allumage commandé, à deux temps ou à quatre temps. Les principaux constituants d'un moteur à combustion sont illustrés dans la figure I.1.

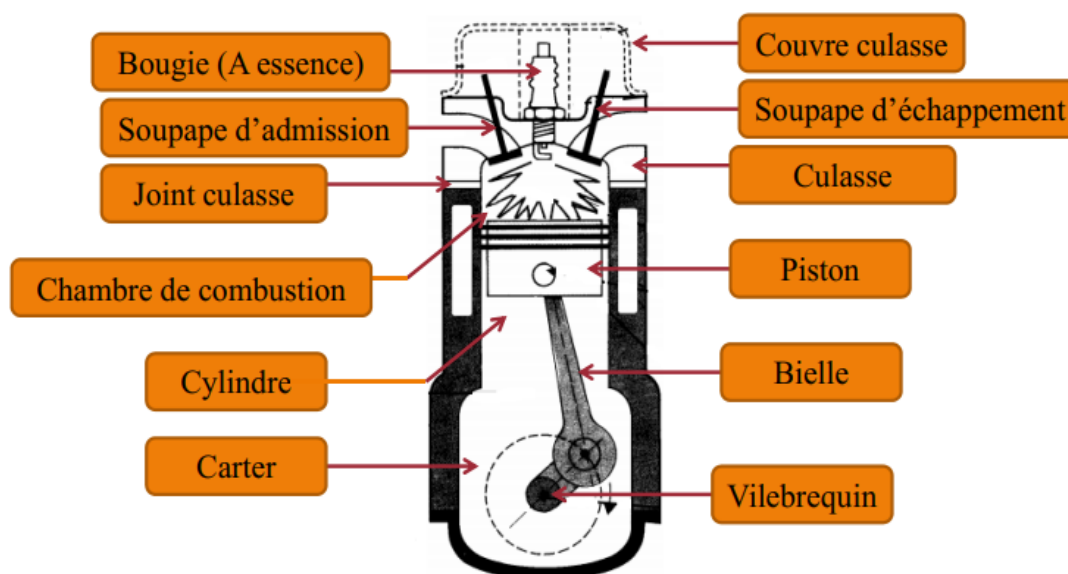


Fig. I.1 Principaux constituants d'un moteur à combustion interne

### I.1.2. Comparaison entre le fonctionnement des moteurs à essence et Diesel

Vu la nature du carburant utilisé dans les moteurs à combustion interne modernes, on peut distinguer deux types de moteurs, le moteur à allumage commandé et le moteur à allumage par compression. les conditions de fonctionnement dans les quatre opérations du moteur Diesel ils ne présentent par les mêmes caractéristiques comme il est indiqué dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : comparaison de fonctionnement

CYCLE	DIESEL	ESSENCE
Admission-1 <sup>er</sup> temps	Air seul	Mélange air+essence
Compression 2 <sup>ème</sup> temps	Taux de compression 30 à 40 bars. Elévation de température 500 à 600°C	Taux de compression 10 à 12 bars. Elévation de température 320 à 380°C
Temps Moteur 3 <sup>ème</sup> temps	Combustion détente injection gazole pulvérisé. Auto inflammation détente des gaz Température des gaz de 1800°C à	Explosion commandée par une étincelle électrique. Explosion détente des gaz Température des gaz de 2000°C à
Echappement – ème	Gaz peu toxiques (particules)	Gaz plus toxiques (C.O)
Consommation spécifique	215 à 300 g/kW/h	310 à 405 g/kW/h

### I.1.3. Cycles théoriques d'un moteur à combustion interne

Les moteurs à combustion interne fonctionnent selon les cycles théoriques thermodynamiques en tenant compte les hypothèses :

- Compression et la détente sont isentropiques.
- La combustion dans les moteurs à essence se fait à volume constant.
- La combustion dans les moteurs diesel se fait à pression constante.
- La combustion est instantanée.
- L'écoulement dans la tubulure d'admission est sans pertes de charge.
- Le balayage des gaz d'échappement est isochore.
- L'écoulement dans le collecteur d'échappement est sans pertes de charge.

### I.1.3.1. Cycle théorique d'un moteur à allumage commandé

Le moteur à essence est alimenté avec un mélange air-essence et le dosage est réalisé soit par carburateur, soit dans le cylindre par injection directe ou indirecte. La quantité d'air admise est modulée par un papillon situé entre le carburateur et la tubulure d'admission (Fig. I.2).

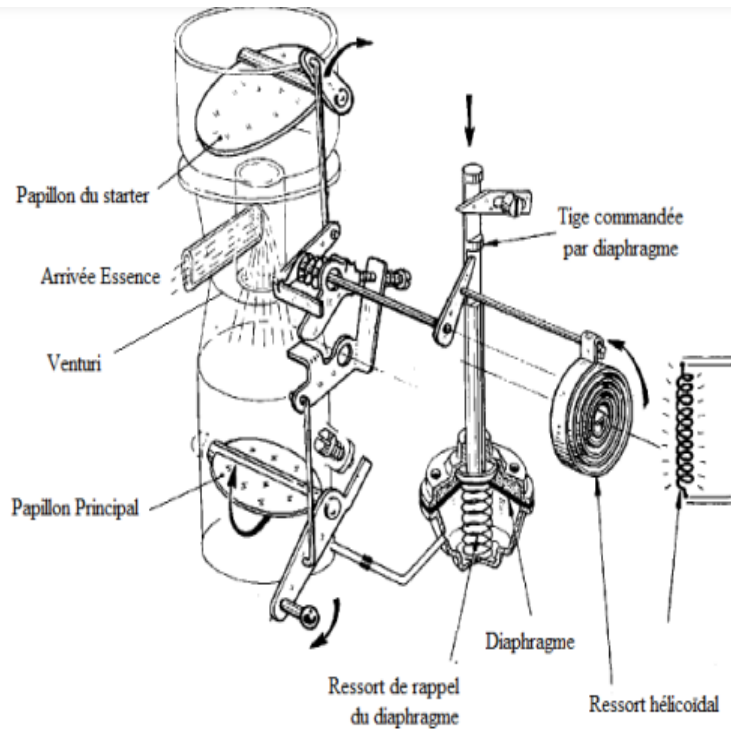


Fig. I.2 Schémas du carburateur

À l'intérieur du cylindre, l'air et le carburant vaporisé se transforment en un mélange gazeux homogène et combustible. L'allumage peut être alors déclenché en provoquant une élévation locale de la température, créant ainsi un noyau enflammé, puis un front de flamme se propageant dans la chambre. Le rapport entre la masse d'air et la masse de carburant est importante et constitue un indicateur de ce que l'on appelle la richesse du mélange carburé.

Pour représenter le cycle théorique d'un moteur à allumage commandé dans un diagramme ( $P V$ ), on utilise le cycle Beau de Rochas (Otto) comme nous indique la figure I.3.

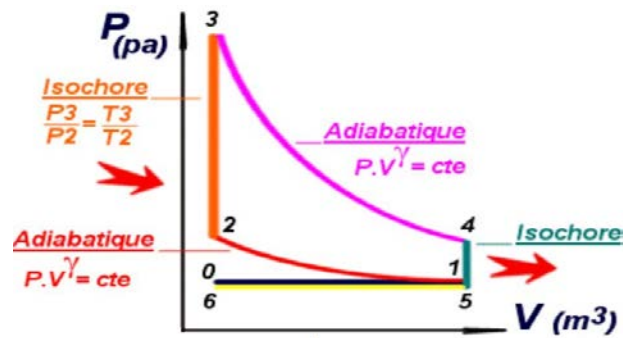


Fig. I.3 Cycle de Beau de Rochas

### I.1.3.2. Cycle d'un moteur Diesel

L'allumage du moteur diesel n'est pas commandé mais spontané par phénomène d'autoallumage (auto inflammation). Pendant le temps de compression l'air est comprimé à une pression comprise entre 30 et 55 bars (moteurs atmosphériques) ou entre 80 et 110 bar (moteurs suralimentés par turbocompresseur) et simultanément chauffé à une température comprise entre 700 et 900 °C. Cette température suffit pour provoquer l'auto-inflammation du carburant injecté peu avant la fin de la compression au voisinage du point mort haut du piston. Le système d'injection se compose comme d'un réservoir de carburant, d'un séparateur d'eau, d'un système de filtration, d'une pompe de distribution et d'injecteurs (Fig. I.4). Le pignon de la pompe distributrice est généralement entraîné par le moteur par le moyen de la chaîne de distribution.

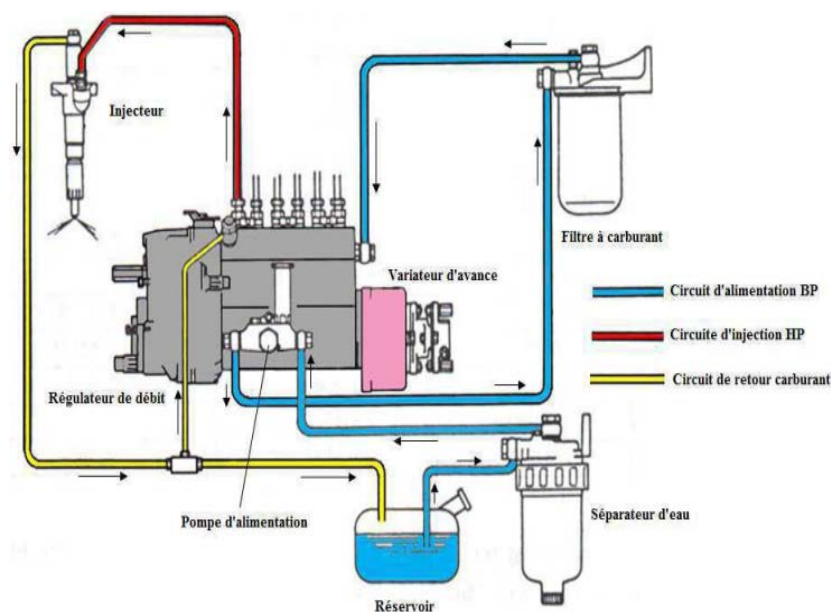


Fig. I.4 Système d'injection

Le cycle théorique du Diesel dans un diagramme ( $P V$ ), est représenté dans la figure I.5.

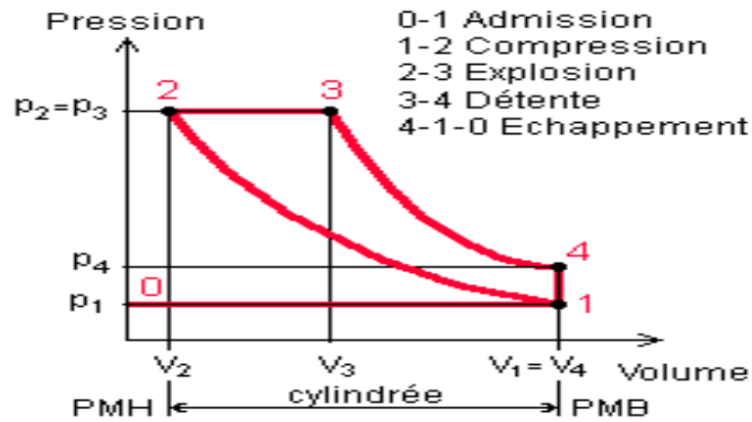


Fig. I.5 Cycle Diesel

### I.1.3.3. Cycle de Sabathe (Seiliger)

C'est cycle mixte employé principalement sur les moteurs diesel moderne à grande vitesse, de 1500 à 5400 tr/min. Dans ce cas, la combustion se fait à volume constant, ensuite, à pression constante (Fig. I.6).

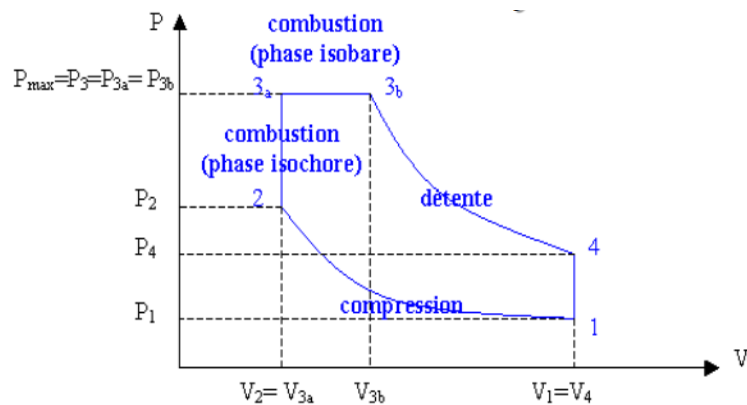


Fig. I.6 Cycle de Sabathe

## I.2. Bilan énergétique

Le bilan énergétique d'un moteur thermique des cycles théoriques dépend de l'énergie échangée ( $Q$ ), du travail fourni et de la variation de l'énergie interne, par conséquent de la variation de l'énergie interne ( $\Delta U$ ), ainsi que le rendement  $\eta_{th}$ .

### I.2.1. Cycle de Beau de Rochas

Tableau I.2

Opération	Travail (W)	Energie échangée (Q)	Energie interne ( $\Delta U$ )
1-2 Compression	$C_v(T_2-T_1)$	0	$\Delta U = W+Q = C_v(T_2-T_1)$
2-3 Inflammation	0	$C_v(T_3-T_2)$	$\Delta U = W+Q = C_v(T_3-T_2)$
3-4 Détente	$C_v(T_4-T_3)$	0	$\Delta U = W+Q = C_v(T_4-T_3)$
4-1 Echappement	0	$C_v(T_1-T_4)$	$\Delta U = W+Q = C_v(T_1-T_4)$
Le rendement $\eta_{th} = \frac{C_v(T_3-T_2)+C_v(T_1-T_4)}{C_v(T_3-T_2)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$			

Sachant que la variation de l'énergie interne d'un cycle théorique :  $\Delta U_{cyc} = \sum W + \sum Q = 0$

et

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}; \quad \varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

### I.2.2. Cycle Diesel

Tableau I.2

Opération	Travail (W)	Energie échangée (Q)	Energie interne ( $\Delta U$ )
1-2 Compression	$C_v(T_2-T_1)$	0	$\Delta U = W+Q = C_v(T_2-T_1)$
2-3 Inflammation	$-P(V_2-V_1)$	$C_p(T_3-T_2)$	$\Delta U = W+Q = C_v(T_3-T_2)$
3-4 Détente	$C_v(T_4-T_3)$	0	$\Delta U = W+Q = C_v(T_4-T_3)$
4-1 Echappement	0	$C_v(T_1-T_4)$	$\Delta U = W+Q = C_v(T_1-T_4)$
Le rendement $\eta_{th} = \frac{C_v(T_3-T_2)+C_v(T_1-T_4)}{C_v(T_3-T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \frac{a^{\gamma-1}}{a^{\gamma-1}}$			

Sachant que  $a = \frac{V_3}{V_2}$

### I.3. Analyse organique

Le moteur à combustion interne rejette dans l'atmosphère d'importantes quantités de dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau, d'oxydes d'azote, de CO, de HC et de suie de faible à l'échappement. Ces chimiques substances, représentent actuellement une source très importante de pollutions particulières, l'effet de serre et le réchauffement climatique sont les conséquences de ces émissions gazeuses envoyées dans l'air. Afin de

déterminer la nature chimique et la concentration des différents constituants des gaz d'échappement ainsi que la composition du carburant, on procède à l'analyse organique.

### I.3.1. Définition

L'analyse organique regroupe les différentes méthodes chimiques propres à l'analyse chimique qualitative et quantitative et qui visent à identifier les composés organiques et à élucider leur composition ainsi que leur structure. L'analyse organique peut être élémentaire ou fonctionnelle.

### I.3.2. Analyse organique élémentaire

L'analyse organique élémentaire vise la composition chimique des substances en éléments chimiques des atomes et des molécules organiques. Elle peut être :

- **Qualitative** : sert à identifier les principaux atomes des molécules constituantes.
- **Quantitative** : détermination de la quantité des principaux atomes des molécules.

Les principales méthodes utilisées pour l'analyse organique élémentaire quantitative sont les méthodes chimiques et les méthodes physiques.

- **Les méthodes chimiques** : Parmi les méthodes chimiques utilisées, on cite :
  - Attaque acide puis analyse par combustion avec un analyseur élémentaire
  - Oxydation de Schöniger : dosage des halogènes, du soufre et du phosphore ;
  - Méthode de Kjeldahl : dosage de l'azote ;
- **Les méthodes physiques** : Le but est d'analyser quantitativement ou qualitativement les éléments constituants d'une substance. Elle se fait par l'une de ces méthodes :
  - Dissociation d'une espèce chimique en atomes libres
  - Spectroscopie optique atomique
  - Spectroscopie des rayons X.

### I.3.3. Analyse fonctionnelle

L'analyse organique fonctionnelle identifie les fonctions chimiques des molécules organiques. Elle peut être :

- **Directe** : les propriétés de la fonction chimique à caractériser sont directement mesurées
- **Indirecte** : une réaction chimique avec la fonction chimique à caractériser aboutit à un dérivé dont les propriétés sont mesurées.

Les principales méthodes utilisées pour l'analyse organique fonctionnelle sont les méthodes physiques et physico-chimiques suivantes :

- Spectrométrie : spectrométrie moléculaire, spectroscopie de résonance magnétique nucléaire, spectrométrie de masse ;
- Méthodes électrochimiques.

#### I.4. Exercice corrigés

##### Exercice 1

La combustion de 1.14 g d'un carburant  $C_xH_y$  donne 3.52 g de  $CO_2$  et 1.62 g de la vapeur d'eau, la densité du  $C_xH_y$  par rapport à l'air est  $d=3.91$

- Ecrire l'équation de la combustion.
- Déterminer la composition chimique du carburant.

##### Solution 1



$$M = 29d = 114 \text{ g} = 12x + y$$

D'où on a les rapports suivants :

$$\frac{m(C_xH_y)}{114} = \frac{m(CO_2)}{x44} = \frac{m(H_2O)}{y9}$$

Donc

$x=8$ ,  $y=18$  alors la composition chimique du carburant est :  $C_8H_{18}$

##### Exercice 2

1. Donner l'expression de l'enthalpie. En déduire, pour un gaz parfait, la relation de Mayer.
2. Sachant que  $\gamma = C_{PM}/C_{VM}$ , exprimer  $C_{PM}$  et  $C_{VM}$  en fonction de  $R$  et  $\gamma$ .
3. Déterminer l'expression de la variation  $\Delta S$  d'entropie pour  $n$  moles d'un gaz parfait

évoluant de manière réversible entre les états  $(T_1, V_1)$  et  $(T_2, V_2)$  en considérant que CVM est constant

4. Retrouver la relation de Laplace dans le cas d'une évolution isentropique (relation entre  $T_1, V_1, T_2, V_2$  et  $\gamma$ ).

### **Solution 2**

1.  $H = U + PV \Rightarrow \Delta H = \Delta U + \Delta(PV)$

Dans le cas d'un gaz parfait :  $n C_{PM} dT = n C_{VM} dT + nRdT \Rightarrow C_{PM} - C_{VM} = R$

2. On obtient :  $C_{VM} = R/(\gamma-1)$  et  $C_{PM} = \gamma R/(\gamma-1)$ .

3.  $\Delta S = n C_{VM} \ln(T_2/T_1) + nR \ln(V_2/V_1)$ .

4. Dans le cas d'une évolution isentropique :  $\Delta S = n C_{VM} \ln(T_2/T_1) + nR \ln(V_2/V_1) = 0 \Rightarrow T_1 \times V_1^{\gamma-1} = T_2 \times V_2^{\gamma-1}$  (loi de Laplace).

### **Exercice 3**

Un moteur à essence fonctionne selon le cycle Beau de Rochas

1 → 2 : Compression adiabatique

2 → 3 : Combustion à volume constant

3 → 4 : Détente adiabatique

4 → 1 : Echappement à volume constant

1. Compléter le diagramme  $(T, S)$  présenté dans la figure I.8

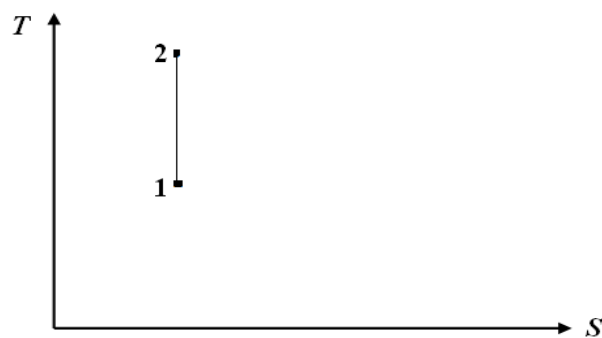


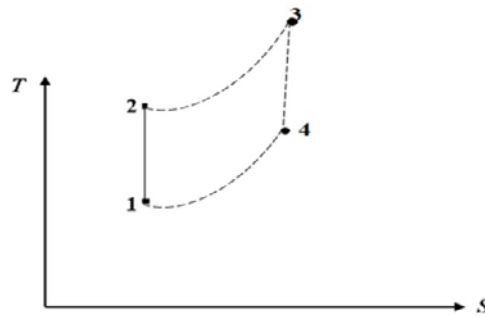
Fig. I.8 Diagramme  $(T, S)$

2. Déterminer P, T et V de à chaque état, sachant que le rapport volumique de compression  $\epsilon=10$  et la température en fin de phase de combustion est  $2700^\circ\text{K}$  (Le

3. mélange est assimilé à un gaz parfait).

4. Calculer le travail et la quantité de chaleur échangée à chaque transformation

5. Déduire le rendement thermodynamique de ce moteur à essence
6. On donne :
- $C_p=29 \text{ J.K}^{-1}$ ,  $R=8.31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ,  $\gamma=1.4$ ,  $T_1=27^\circ\text{C}$ ,  $P_1=1 \text{ bar}$ .
  - Pour une transformation adiabatique  $PV^\gamma=Cst$  et  $TP^{\gamma-1}=Cst$ .

**Solution 3**

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P_1} = 0.0249 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = 0.00249 \text{ m}^3$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = 25.11 \text{ bars}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{nR} = 753.3 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$V_2 = V_3 = 0.00249 \text{ m}^3$$

$$P_3 = \frac{nRT_3}{V_3} = 90 \text{ Bars}$$

$$V_4 = V_1 = 0.0249 \text{ m}^3$$

$$P_4 = P_3 \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^\gamma = 3.58 \text{ Bars}$$

$$T_4 = \frac{P_4 V_4}{nR} = 1074.01 \text{ }^\circ\text{k}$$

$$Q_{12} = 0, \quad W_{12} = C_v(T_2 - T_1) = 9387.84 \text{ J}$$

$$W_{23} = 0, \quad Q_{23} = C_v(T_3 - T_2) = 40316.15 \text{ J}$$

$$Q_{34} = 0, \quad W_{34} = C_v(T_4 - T_3) = -33674.25 \text{ J}$$

$$W_{41} = 0, \quad Q_{41} = C_v(T_1 - T_4) = -16029.74 \text{ J}$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_{41}}{Q_{23}} = 0.603$$

## Chapitre II : Chaînes cinématique principale et auxiliaires fonctionnels

### II.1. Chaîne cinématique principale

#### II.1.1. Définition

C'est la chaîne qui regroupe l'ensemble des organes du véhicule permettant la transformation du mouvement du moteur aux roues (Fig. II.1). Elle est constituée du moteur, de l'embrayage, de la boîte de vitesses, de l'arbre de transmission, du pont différentiel, du réducteur et de roues.

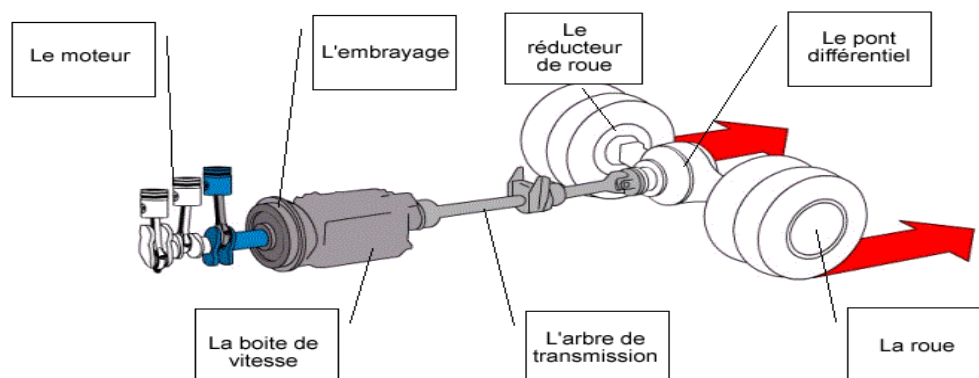
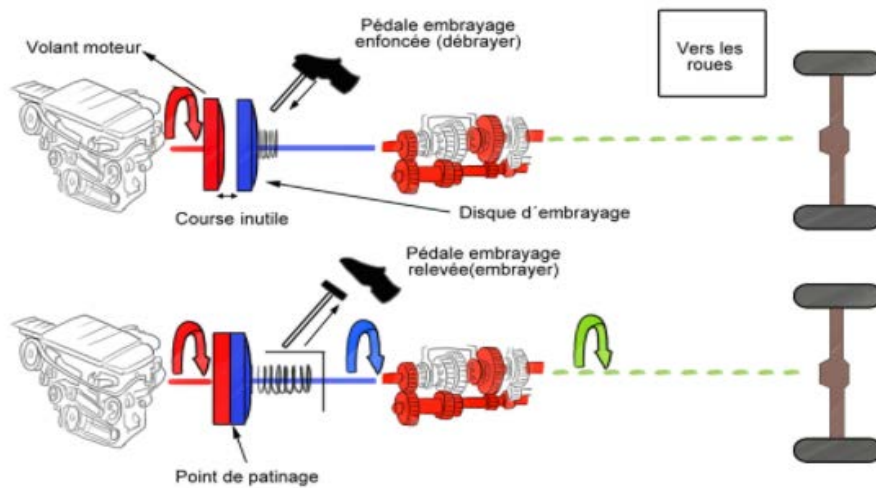


Fig. II.1 Chaîne cinématique

#### II.1.1. Rôles des organes de la chaîne cinématique

- **Moteur** : Le rôle du moteur est de transformer l'énergie calorifique du carburant en une énergie mécanique. Il provoque la combustion du carburant pour créer l'énergie qui servira à mouvoir les roues. Le reste de la chaîne cinématique transporte et transforme cette énergie jusqu'aux roues.
- **L'embrayage** : Il permet d'accoupler ou désaccoupler le moteur du reste de la chaîne de transmission afin de pouvoir le changement de vitesse, il permet aussi en phase de patinage la mise en mouvement du véhicule (Fig. II.2).



- Fig. II.2 L'embrayage

- **Boîte à vitesse** : La boîte de vitesses transforme le couple du moteur pour l'adapter à la force de résistance créée par le déplacement du véhicule. L'intérêt de la boîte de vitesses est double. Tout d'abord, elle permet de compenser le manque de souplesse du moteur à explosion qui ne peut varier que dans des limites de vitesse assez étroites. De plus, elle permet de faire en sorte que le moteur soit toujours dans un mode de fonctionnement *optimum*. Le changement de vitesse, en démultipliant ou au contraire en réduisant le nombre de tours du moteur, permet de faire en sorte que malgré la variation de la vitesse du véhicule, la vitesse de rotation du moteur soit toujours le même (Fig. II.3)



Fig. II.3 Boîte à vitesse

- **L'arbre de transmission** : L'arbre de transmission transmet le mouvement de la boîte de vitesses vers le pont (Fig. 4). Il existe:

- Arbres de transmission longitudinaux disposés entre la boîte de vitesse et le pont (Véhicule à propulsion arrière)
- Arbres de roues ou demi-arbres moteur disposés entre le pont et les roues motrices

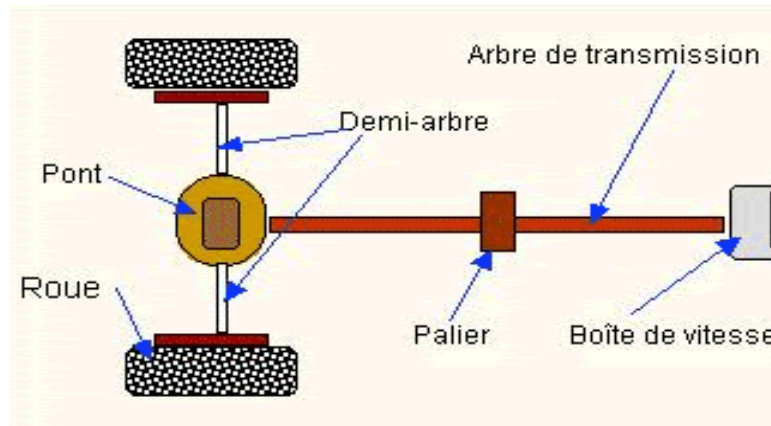


Fig. II.4 Arbre de transmission

- **Pont différentiel :** Le différentiel est composé de plusieurs pièces, notamment plusieurs pignons et une couronne dentée. Il ne faut donc pas croire qu'il s'agit d'une seule et unique pièce mécanique. Le pignon principal du différentiel est un pignon conique solide de l'arbre moteur appelé pignon planétaire. Il est placé à l'extrémité du demi-arbre de roue, face au pignon conique du second demi-arbre. Ces deux pignons entraînent une roue crantée et supportent une cage de différentiel, aussi appelée boîtier de différentiel, qui porte elle-même des pignons plus petits qu'on appelle pignons satellites. Ces derniers tournent à la fois sur eux-mêmes et autour de l'axe du pignon planétaire (Fig. II.5).

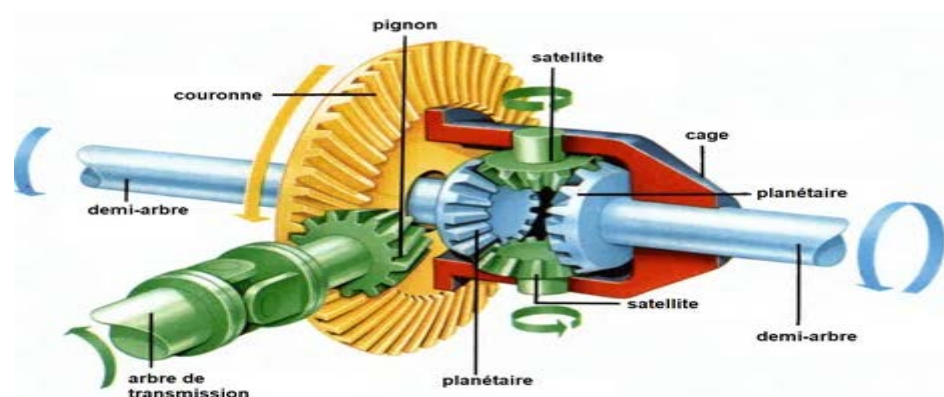


Fig. II.5 Pont différentiel

- **Réducteur de roue** : Il permet de diminuer la vitesse de rotation et augmenter ainsi le couple transmis aux roues (Fig. II.6)

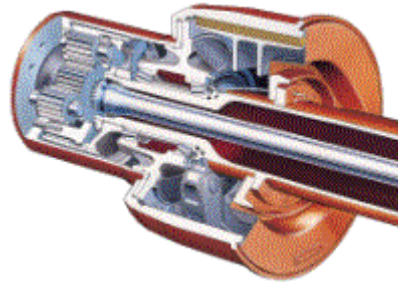


Fig. II.6 Réducteur de roue

- **Les roues** : c'est le dernier organe de la chaîne de transmission, elle transmet le mouvement au sol et transforme ainsi le mouvement de rotation en mouvement rectiligne (Fig. II.7).



Fig. II.7 Roues d'un véhicule

## II.2. Auxiliaires fonctionnels

Aucun moteur à combustion interne moderne n'est capable de fonctionner indépendamment. Il en est ainsi parce que le carburant doit être acheminé du réservoir d'essence au moteur. Les pièces rotatives nécessitent une lubrification constante. En raison des températures élevées générées par la combustion, le moteur doit être refroidi. Ces processus d'accompagnement ne sont pas fournis par le moteur lui-même, de sorte que le moteur à combustion interne fonctionne avec des systèmes auxiliaires.

La chaîne auxiliaire du moteur à combustion interne est composée des systèmes suivants :

- Système d'allumage
- Système d'alimentation en carburant
- Système de refroidissement
- Système de lubrification
- Système de distribution
- Système d'échappement

### II.2.1. Système d'allumage

Pour un moteur Diesel, l'allumage se fait par compression, alors que dans les moteurs à essence, l'allumage est déclenché par une bougie qui donne une étincelle électrique entre deux électrodes dans la chambre de combustion, donc, on a un recours à un système qui assure la synchronisation de l'apparition de l'étincelle à partir d'une source électrique avec les positions du piston. Généralement, l'allumage par batterie est encore utilisé, mais il est de plus en plus remplacé par l'allumage électronique plus performant et plus fiable (Fig. II.8).

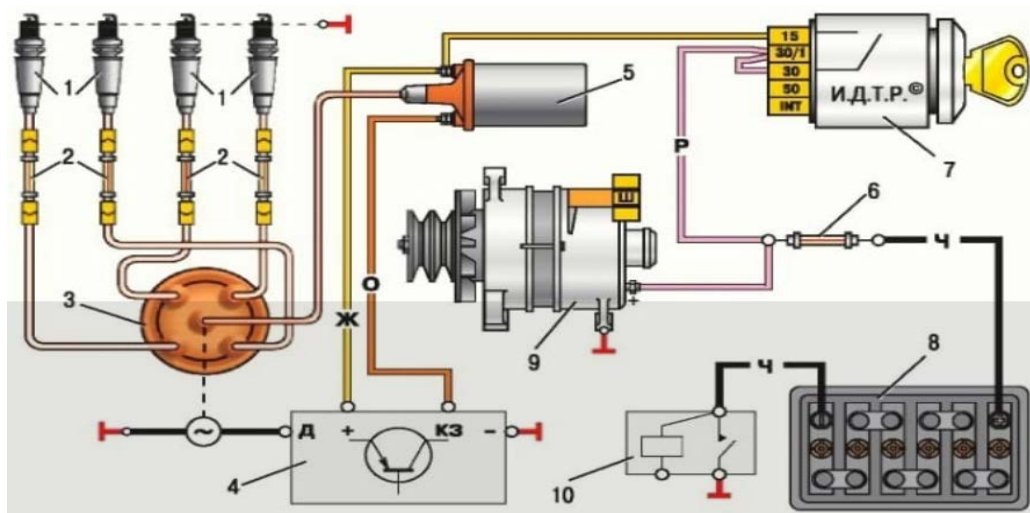


Fig. II.8 Système d'allumage

Le système d'allumage est composé de:

- **Bougie** : Chargé de déclencher l'inflammation du mélange air/carburant afin de libérer une énergie calorifique permettant le mouvement de piston (Fig. II.9). Les électrodes de la bougie doivent être parfaitement propres pour produire une étincelle suffisamment puissante. Pour nettoyer une bougie, il faut avant tout laisser refroidir son véhicule. Démontez vos bougies selon le manuel d'entretien de votre voiture, puis nettoyez à l'aide d'une brosse métallique les dépôts huileux et/ou charbonneux



Fig. II.9 Bougie d'allumage

- **Batterie** : Elle ne produit pas de courant, mais sert à emmagasiner le courant électrique produit par l'alternateur. Elle le diffuse ensuite dans la voiture avec une tension et une capacité précise selon le type de batterie installée. À noter qu'il s'agit généralement d'une batterie 12 V pour un véhicule de tourisme, tandis que les 24 V aux camions. La batterie permet aussi le démarrage de la voiture lorsque le conducteur tourne la clé. Quand la voiture roule, elle alimente tous les équipements électriques présents sur le véhicule : phares, feux de stop, autoradio, écran tactile, etc.
- **Bobine** : Composée de 2 enroulements inductifs: un circuit primaire et un circuit secondaire qui génère la tension électrique nécessaire à l'éclatement de(s) étincelles aux électrodes de(s) bougie(s). Le rôle d'une bobine d'allumage est de convertir le courant de basse tension qui provient de la batterie du véhicule en une tension bien plus élevée qui permet de démarrer le moteur de la voiture.

### II.2.2. Système d'alimentation en carburant

Dans les moteurs à allumage commandé, le carburateur le plus employé

actuellement est l'essence, il entre par les soupapes d'admission reliés à l'arbre a came. Alors que dans le moteur Diesel comptent sur le système d'injection. Il met le carburant sous pression et l'injecte. Le carburant est ainsi éjecté à l'air qui a été comprimé à forte pression dans la chambre de combustion (Fig. II.10).

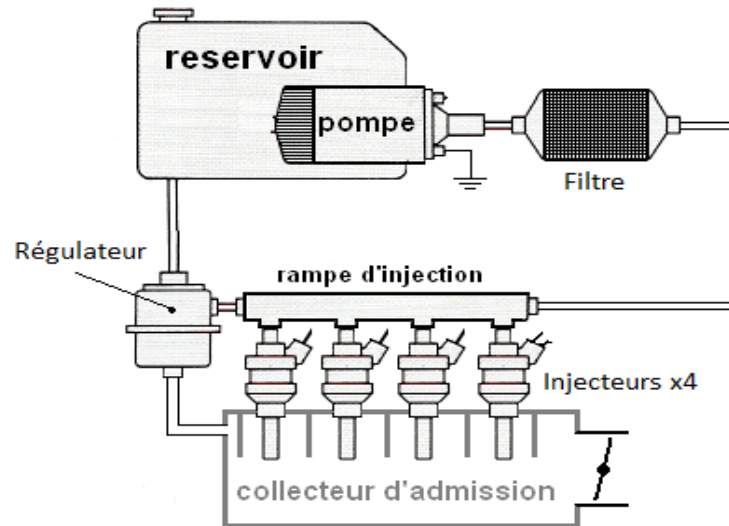


Fig. II.10 Système d'alimentation

Dans les deux types de moteurs, ce système est composé d'un circuit d'air, circuit de carburant.

- **Circuit d'air :** Il est relativement simple puisqu'il comporte essentiellement une tuyauterie qui prélève l'air frais à l'avant de la voiture ou dans le compartiment moteur, et l'air chaud sur le collecteur d'échappement pour l'amener au carburateur ou à l'injection.
- **Circuit de carburant :** Plus complexe, il comprend un réservoir, des canalisations, une pompe et un filtre. Le réservoir est relié au moteur grâce à une canalisation qui parcourt la longueur de la voiture sous le plancher. Il s'agit d'une tuyauterie en cuivre ou en plastique d'environ 6 à 8 mm de diamètre. La pompe assure pompe le carburant du réservoir vers le collecteur d'admission.

### II.2.3. Système de refroidissement

Est l'ensemble des organes qui servent à évacuer l'énergie calorifique non transformée en énergie mécanique et d'éviter les risques de surchauffe susceptible de

causer des dommages irréremédiables. Le plus souvent, il s'agit d'eau avec un additif permettant d'augmenter la température d'ébullition et la résistance au gel (Fig. II.11)

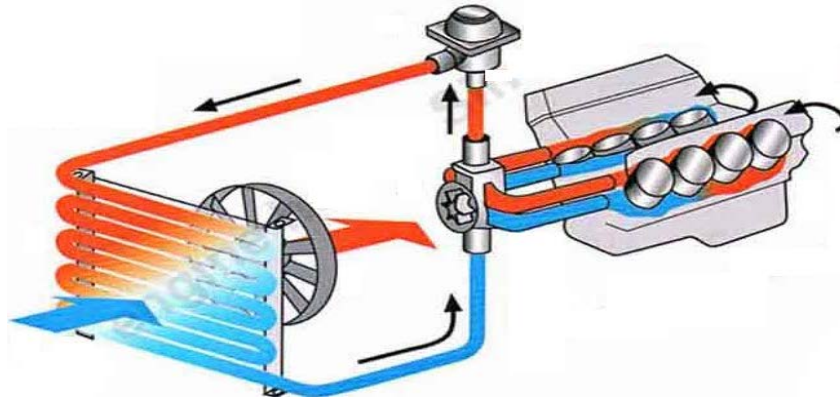


Fig. II.11 Système de refroidissement

Lors de la combustion du carburant et absorbée par les composants du moteur est transmise au liquide de refroidissement. Grâce à la circulation, la chaleur est transmise à l'air extérieur ce qui refroidit le liquide de refroidissement. Un ou plusieurs ventilateurs (à entraînement mécanique ou électrique) qui peuvent être installés avant ou après le radiateur contribuent au processus de refroidissement. C'est notamment le cas lors de trajets lents ou lorsque le véhicule est à l'arrêt. Pour maintenir la température du liquide de refroidissement ou du moteur à une valeur relativement constante, le flux du liquide de refroidissement est contrôlé par un thermostat.

#### II.2.4. Système de lubrification

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre (Fig. II.12). Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion...

On parle de lubrification dans le cas où le lubrifiant est liquide et de graissage dans le cas où il est compact. Dans les moteurs thermiques, le carter doit être rempli en respectant les niveaux mini et maxi, la lubrification est faite par la trempe de la mécanique dans un lubrifiant liquide, on parle alors de bain d'huile ou de barbotage. Généralement, Le lubrifiant se dégrade, en particulier sous l'effet de la forte chaleur, et se charge en débris d'usure : il faut donc vidanger régulièrement le réservoir et le

remplir avec du lubrifiant neuf. Dans certains cas (qui a tendance à se généraliser), l'huile passe par un radiateur de refroidissement, avant de retourner lubrifier les organes qui utilisent le même fluide (moteur, boîte-pont, turbo).

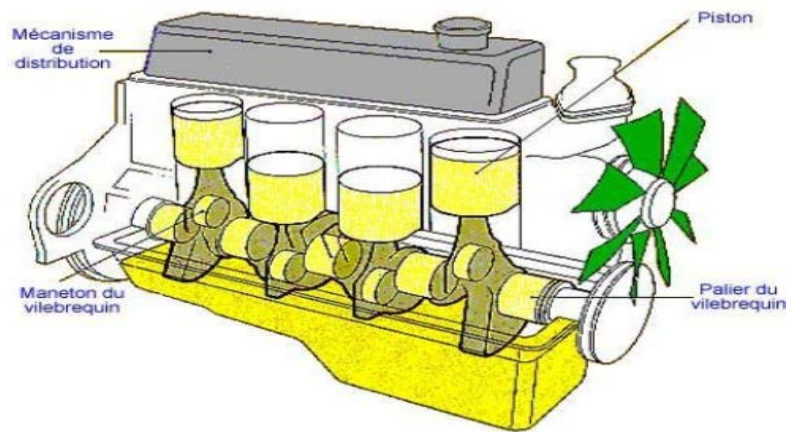


Fig. II.12 Système de lubrification

### II.2.5. Système de distribution

Le mouvement circulaire du vilebrequin est transmis à l'arbre à cames par le biais d'un système appelé "système de distribution" puisqu'il est chargé d'utiliser et de distribuer la force transmise par le bas moteur à l'ensemble du moteur et ainsi faire fonctionner un ensemble d'éléments de manière synchronisés (Fig. II.13).

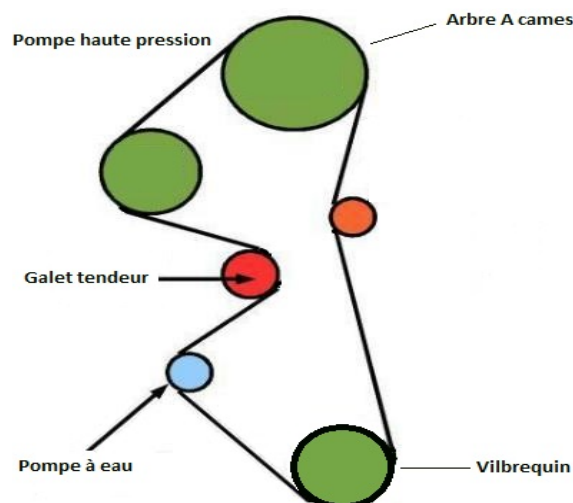


Fig. II.13 Système de distribution

La distribution se fait par : Chaîne métallique, cascade de pignons et courroie

### II.2.6. Système d'échappement

Le système d'échappement désigne le circuit permettant d'évacuer les gaz de combustion provenant du moteur vers le milieu extérieur, il est constitué le plus souvent de : Les principaux composants du système d'échappement : Collecteur d'échappement, pot catalytique, sonde oxygène, silencieux et les chambres de réglage Helmholtz (Fig. II.14).

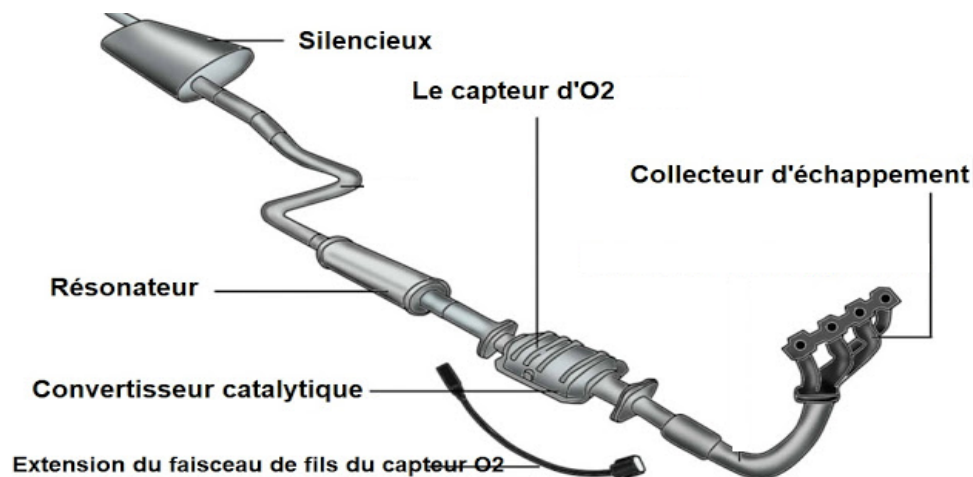


Fig. II.14 Système d'échappement

- **Le collecteur d'échappement** réceptionne les gaz d'échappement du moteur. Le collecteur atténue le niveau sonore de la combustion et transporte la chaleur vers l'arrière du véhicule afin d'amplifier l'oxydation des hydrocarbures non consommés et du monoxyde de carbone
- la **sonde d'oxygène** qui permet d'optimiser l'efficacité et la performance du véhicule en tenant compte de tous les paramètres variables : le régime du moteur, la température du moteur, la température de l'air, la température du liquide de refroidissement, ...
- **Le silencieux** diminue les bruits d'échappement en les entraînant à l'intérieur de compartiments qui sont nommés chambres de résonance Helmholtz.
- **Le pot catalytique** se trouve bien plus loin dans le dispositif d'échappement. Cette partie est spécialement conçue pour transformer les gaz d'échappement toxiques en dioxyde de carbone, qui n'est pas agressif, et en vapeur d'eau à l'aide d'une réaction chimique nécessitant des catalyseurs.

---

### II.3. Exercices corrigés

1. Comment entretenir une bougie d'allumage ?
2. Quand faut-il changer une bougie d'allumage?
3. Comment changer une bougie d'allumage?
4. Comment se manifeste les signes et les symptômes d'une bobine d'allumage ?
5. C'est quoi une lubrification continue ?
6. Quelle est la manière de lubrification d'un moteur à combustion interne ?
7. Quelles sont les modes de transmission du mouvement ?
8. Quelle est le rôle de la courroie de distribution ?
9. Comment savoir si on a une chaîne ou une courroie de distribution ?
10. Comment fonctionne un tendeur de chaîne de distribution ?
11. Comment savoir si la chaîne de distribution est cassée ?
12. Quand il faut changer la chaîne de distribution ?

### Solutions

1. Les électrodes d'une bougie doivent être parfaitement propres pour produire une étincelle suffisamment puissante. Pour nettoyer une bougie, il faut laisser refroidir le moteur, ensuite, on démonte les bougies selon le manuel d'entretien de la voiture, puis on les nettoie à l'aide d'une brosse métallique les dépôts huileux et/ou charbonneux.
2. L'entretien d'une bougie d'allumage se fait tous les 25.000km environ (variable en fonction de l'ancienneté et du type de votre véhicule), et tous les 10.000km en ville. Il peut également se faire quand le moteur a tendance montre des signes de faiblesse lors du démarrage.
3. Munissez-vous d'une clé à cliquet, d'une rallonge, d'une douille à bougie. Débranchez la borne négative de votre batterie. Faites très attention de ne pas arracher le fil de la bougie que vous vous apprêtez à changer. Après avoir retiré la bougie, nettoyez les filetages à l'aide d'une brosse métallique ou de l'air comprimé. Appliquez de l'huile sur les filetages, puis remontez la nouvelle bougie.
4. Au démarrage, le démarreur tourne mais le moteur ne se lance pas (moteur à une seule bobine) et le tableau de bord indique un défaut (voyant moteur orange). Le moteur tourne mal, semble moins puissant ou cale souvent.

---

5. La lubrification continue touche tous les mécanismes en mouvement et est constituée par un système de conduites qui amène, par l'intermédiaire d'une pompe, le lubrifiant vers les divers organes (paliers, coussinets, roulement à billes) à lubrifier. Le lubrifiant retourne au bac pour y être réfrigéré puis remonte en traversant un filtre qui retient les impuretés.

6. Mettre le lubrifiant avant le mouvement ou durant le mouvement. Cela peut se faire de manière manuelle, par exemple en déposant des gouttes d'huile avec une burette, en plaçant de la graisse avec les doigts (si celle-ci n'est pas toxique), ou bien en appliquant le lubrifiant avec un pinceau. C'est par exemple le cas de la lubrification d'une chaîne de vélo, des gonds d'une porte... Cette lubrification peut aussi s'effectuer par projection à l'aide d'un aérosol (bombe).

7. Par courroie, pignon, chaîne métallique.

8. Sa principale fonction est la synchronisation de plusieurs pièces du moteur. Grâce à ses crans, elle fait tourner la poulie de l'arbre à cames et le vilebrequin au même rythme. Ce mouvement empêche les pistons de s'entrechoquer.

9. Vous pouvez savoir si votre voiture est équipée d'une chaîne ou d'une courroie de distribution grâce à un simple contrôle visuel : La courroie de distribution est souple, en caoutchouc et de couleur noire. La chaîne de distribution est en métal, elle ressemble à une chaîne de vélo avec des maillons.

10. Généralement, le tendeur hydraulique se charge automatiquement de retendre votre chaîne de distribution. Vous n'avez donc rien à faire. Mais si vous constatez du jeu au niveau de votre chaîne de distribution, il y a peut-être un réglage à faire

- La chaîne est décalée ou allongée par rapport à son axe
- Votre chaîne de distribution fait du bruit, souvent un cliquetis
- Vous trouverez des particules de métal dans l'huile
- Le moteur perd en puissance
- Votre voiture ne démarre pas ou cale

11. chaîne de distribution est bien plus durable qu'une courroie de distribution, sa durée de vie est égale voire supérieure à 200 000 km. Certaines chaînes peuvent être changées tous les 10 ans selon les recommandations des constructeurs.

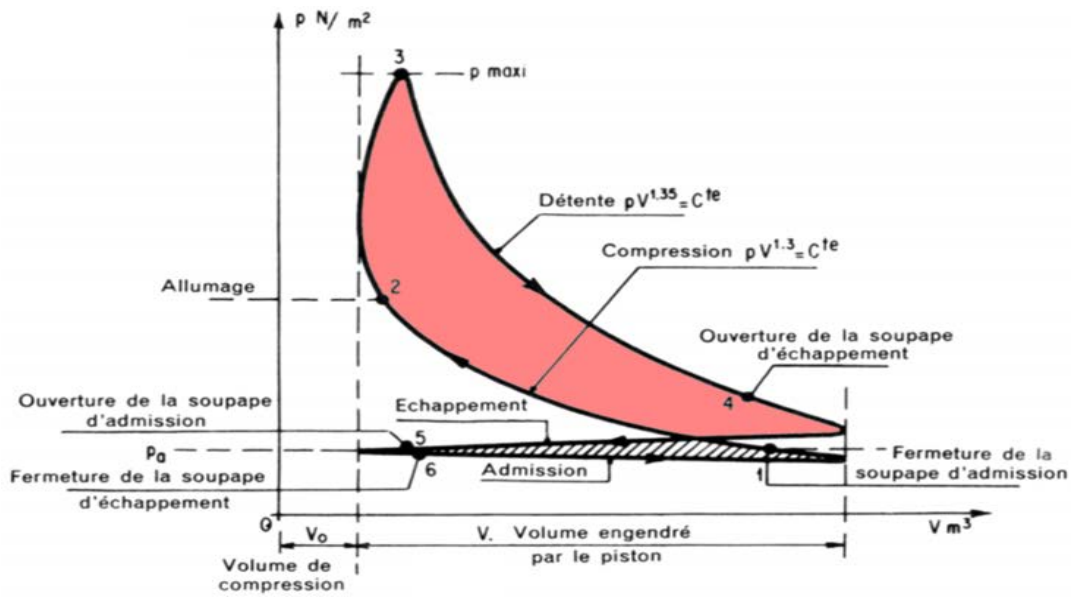
## Chapitre III : Cycles thermodynamiques réels, effets pariétaux et flux d'énergie

### III.1. Cycles thermodynamiques réels

En pratique, toute la chaleur fournie ne peut pas être récupérée mécaniquement, donc, il est impossible qu'un moteur thermique peut fonctionner suivant le cycle théorique pour les raisons suivantes :

- Perte de chaleur à travers les parois (Effets pariétaux)
- Compression et détente ne sont plus adiabatiques
- Les pertes de charge ne sont pas négligeables dans les soupapes, les tubulures, les collecteurs et les papillons.
- Le balayage des gaz d'échappement ne se fait pas convenablement
- Une part restante se perdant dans les gaz d'échappement
- À l'admission, la pression est inférieure à l'atmosphérique
- Pertes mécaniques dues à la force de frottement ne sont plus négligeables
- L'inflammation dans les moteurs à essence et diesel, ne sont plus à volume constant et à pression constante respectivement

On représente le cycle réel d'un moteur à combustion interne par un diagramme dit « diagramme indiqué », illustrant la variation de la pression dans le cycle en fonction du volume ( $v$ ) comme nous indiquent les figures III.1, III.2 et III.3 représentent respectivement les cycles réels des moteurs à allumage commandé, par compression et mixte.



III.1 Cycle réel à allumage commandé

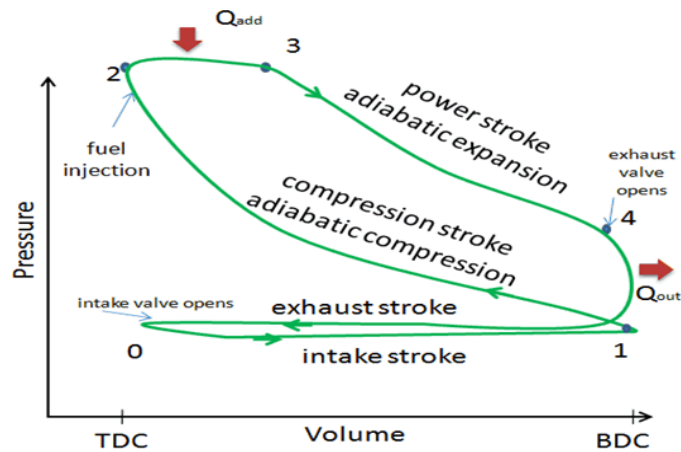


Fig. III.2 Cycle réel Diesel

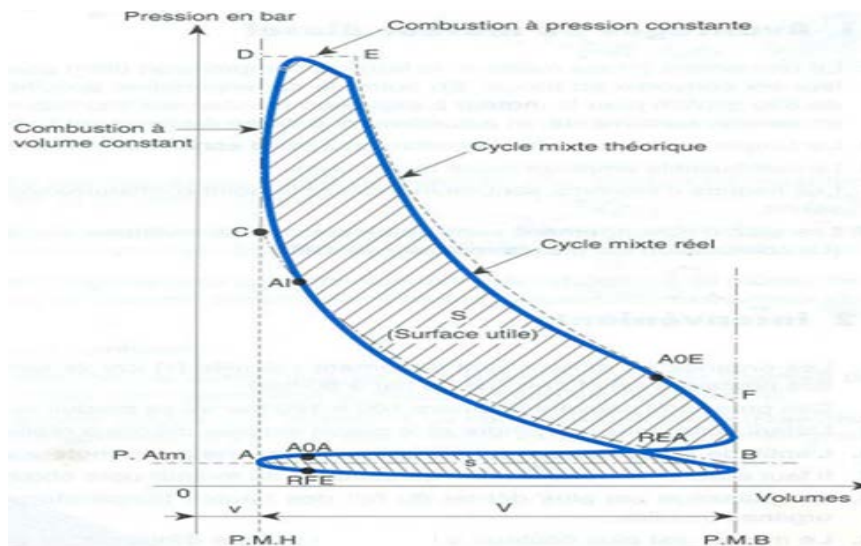


Fig. III.3 Cycle réel mixte

### III.2. Paramètres indiqués et paramètres effectifs

Les paramètres indiqués caractérisent le cycle réel. Ils ne tiennent compte que les pertes de chaleur du cycle réel, les pertes mécaniques ne sont pas considérées. Les paramètres effectifs englobent les pertes de chaleur et les pertes mécaniques (Fig. III.4). Pour passer des paramètres indiqués aux paramètres effectifs du moteur il faut tenir compte de la partie du travail indiqué perdue pour récompenser les pertes mécaniques. Ces pertes sont évaluées par un paramètre que l'on appelle rendement mécanique  $\eta_m$ . Comme le rendement mécanique est toujours inférieur à un, les paramètres effectifs sont toujours inférieurs à ceux indiqués.

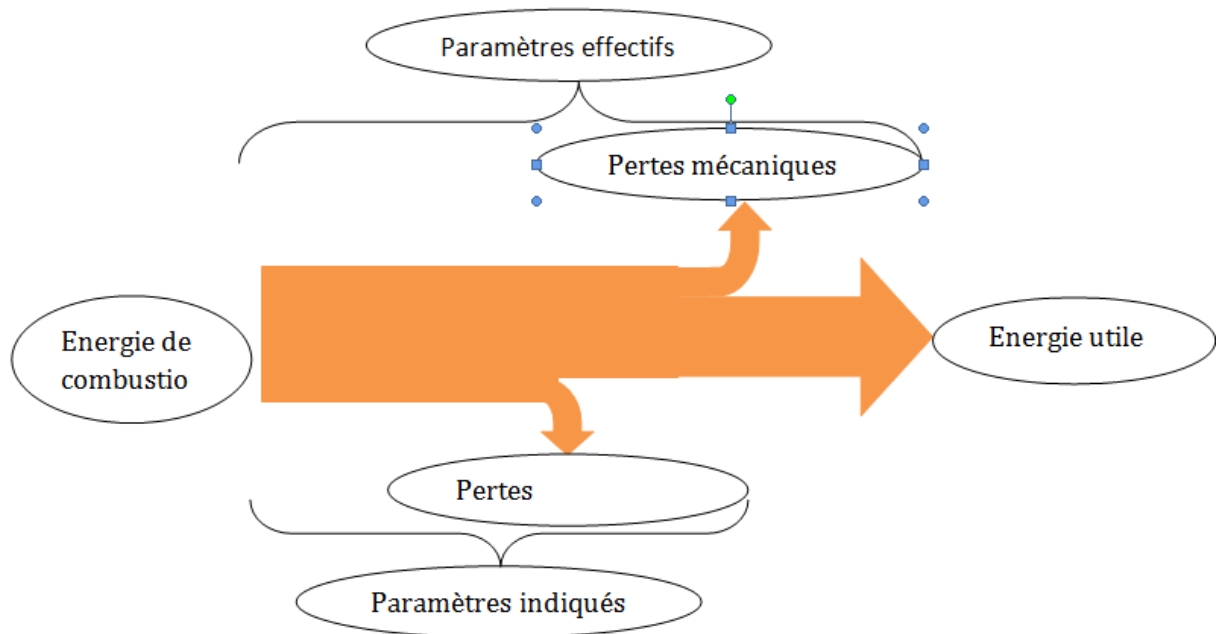


Fig. III.4 Différentes pertes dans un moteur à combustion interne

Quelque soit le type de moteur, l'apport de chaleur se fait pendant la phase de combustion, l'énergie calorifique est désigné par  $Q_{com}$ .

Donc, on définit les paramètres suivant :

- Rendement théorique  $\eta_{th}$

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{Q_{com}} \quad (III.1)$$

- Rendement indiqué  $\eta_i$

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{com}} \quad (III.2)$$

- Rendement interne

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{com}} \quad (\text{III.3})$$

- Rendement mécanique

$$\eta_m = \frac{W_i}{W_{eff}} \quad (\text{III.4})$$

- Rendement effectif

$$\eta_{eff} = \eta_i \eta_m \quad (\text{III.5})$$

### III.3. Transfert thermique pariétal et flux de chaleur

Lors de la combustion, la chaleur libérée est absorbée dans les gaz frais et augmente leur température. Lorsque le front de flamme s'approche de la **paroi**, une partie de cette chaleur est transférée à celle-ci, ce qui refroidit d'autant les gaz, ce transfert est d'autant plus important que le front de flamme est proche. En termes d'échanges thermiques, comme le front de flamme est une zone de température très élevée, des gradients thermiques sont créés lors de l'interaction flamme-paroi. L'évaluation du flux de chaleur à la paroi constitue alors, un défi majeur. Celui-ci doit reposer sur une bonne modélisation des phénomènes physiques mis en jeu étant donné que la quantité de chaleur perdue à la paroi d'une chambre influence le bilan énergétique d'un moteur.

En intervenant le coefficient  $h$  de Newton, les pertes thermiques  $Q_w$  à travers la paroi de la chambre de combustion sont généralement conditionnées par les différents modes de transfert de chaleur selon la loi :

$$Q_w = h(\Delta T) \quad (\text{III.4})$$

### III.4. Exercices corrigés

#### Exercice 1

Quelles sont les paramètres de performance d'un moteur à combustion interne ?

Que signifie paramètres indiqués et paramètres effectifs ?

**Solution 1**

Les paramètres de performance d'un moteur: Rendement, pression, travail, puissance.....

**Les paramètres indiqués** caractérisent le cycle réel considéré. Ils ne tiennent compte que les pertes de chaleur du cycle réel. Pour passer des paramètres indiqués aux paramètres effectifs du moteur il faut tenir compte de la partie des pertes mécaniques.

**Exercice 2**

Un moteur à combustion interne fonctionne suivant le cycle mixte (cycle de SABATHE).

Ce cycle est caractérisé par les paramètres suivants :

$$\lambda = 1.5, \gamma = 1.4, q_3 = 400 \text{ (Kj/Kg)}, \varepsilon = 14, t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}, v_2 = 1 \text{ (m}^3/\text{Kg)}, \eta_{th} = 50 \%$$

1- Tracer ce cycle sur un diagramme P-V ?

2- Calculer les variables d'état du fluide moteur ( $P, v, T$ ) aux points caractéristiques du cycle 1, 2, 3, 4 et 5 ?

3- Calculer la pression moyenne indiquée  $P_{mi}$  du cycle ?

4- Calculer le taux de détente préalable  $\varepsilon'$  ?

5- Que devient ce cycle lorsque  $\varepsilon' = 1$  ?

6- Calculer la vitesse moyenne du piston de ce moteur sachant que  $N=3000$  tours/min.

On donne : alésage du cylindre  $D = 90$  mm et le rapport course du piston/alésage du cylindre = 1.5 ?

**Solution 2**

**Point 1 :**  $v_1 = v_2. \varepsilon=14 \text{ (m Kg-3)} ; T_1 = 343 \text{ K} ; P_1 = r.T_1 / v_1 = 7031.5 \text{ Pascal}$

**Point 2 :**  $v_2=1 \text{ (m Kg}^{-3}) ; T_2=T_1.(v_1/v_2)^{\gamma-1} = 985.70 \text{ K} ; P_2 = P_1. (v_1/v_2)^\gamma = 822896.27 \text{ Pascal}$

**Point 3 :**  $P_3 = \lambda.P_2 = 424344.34 \text{ Pascal} ; v_3=v_2 ; T_3 = \lambda.T_2=1478.55 \text{ K}$

**Point 5 :**  $T_5=T_1+q_3/C_v=T_1+ q_3.103 (\gamma-1)/r= 900.49 \text{ K}$  où :  $r=287 \text{ (J/Kg. )} ; v_5=v_1=14 \text{ (m}^3/\text{Kg)}$  ; et  $P_5=r.T_5/v_5 = 18460.04 \text{ Pascal}$

**Point 4 :**  $P_4=P_3 ; T_4=T_5. (P_5/P_4)^{(1-\gamma)/\gamma} = 2205.33 \text{ K} ; v_4=r.T_4/P_4= 1.49 \text{ (m}^3/\text{Kg)}$

3-Calcul de la pression moyenne indiquée  $P_{mi}$  :

On utilise la définition de la  $P_{mi}$  ;

$$P_{mi} = w / ((V_1 - V_2)) = \eta_{th} (q_1 - q_2) / (V_1 - V_2) = \eta_{th} [c_v.(T_3 - T_2) + c_p.(T_4 - T_3)] / (V_1 - V_2)$$

$$\text{Cylindrée unitaire} = \pi. D^2 / 4 . C_p = \pi. D^2 / 4. (1.5.D) = 1.5. \pi / 4. D^3. 10^{-9} = 95.37. 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{avec: } \{ \gamma = c_p / c_v \quad 2870.4 = 1004 \text{ (Kg Joule.K)}$$

**A .N :**  $P_{mi} = 5691.93. 10^6 \text{ Pascal}$

4- Calcul du taux de détente préalable :  $\varepsilon' = V_4/V_3 = 1.49$

5- Si  $\varepsilon' = V_4/V_3 = 1$ ; alors le cycle devient Essence.

6- Calcul de la vitesse moyenne du piston :

$$V_{\text{moy. piston}} = C.P.N30 = 1.5.D.10^{-3} \cdot N30 = 13.5 \text{ m/sec}$$

### **Exercice 3**

Pour une mole de mélange (air + carburant), un moteur à essence fonctionne selon le cycle suivant :

- 1 → 2 : Compression adiabatique
- 2 → 3 : Combustion à volume constant
- 3 → 4 : Détente adiabatique
- 4 → 1 : Echappement à volume constant

1. Tracer le diagramme ( $P V$ ) du cycle.
2. Compléter le tableau suivant, sachant que le rapport volumique de compression  $\varepsilon = 10$  (le mélange est assimilé à un gaz parfait).

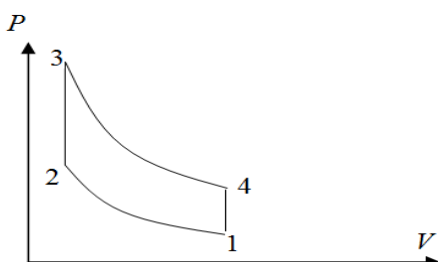
Etat	$T$ (°K)	$V$ (m <sup>3</sup> )	$P$ (bars)
1		0.0249	1
2			
3	2700		
4			

3. Calculer le travail et la quantité de chaleur échangée à chaque transformation.
4. Déduire le rendement thermodynamique de ce moteur.

On donne :

- $C_p = 29 \text{ J.K}^{-1}$ ,  $R = 8.31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ,  $\gamma = 1.4$ .
- Pour une transformation adiabatique  $PV^\gamma = \text{Cst}$  et  $TP^{\gamma-1} = \text{Cst}$ .

### **Solution 3**



2.

Etat	$T$ (°K)	$V$ (m <sup>3</sup> )	$P$ (bars)
1	298.43	0.0249	1
2	753.3	0.00249	25.11
3	2700	0.00249	90
4	1074.01	0.0249	3.58

3.

	1--2	2--3	3--4	4--1
$Q$ (J)	0	40316.15	0	-16029.74
$W$ (J)	9387.48	0	-33674.25	0

5.

$$\eta = 1 + \frac{Q_{41}}{Q_{23}} = 0.603$$

**Exercice 4**

Un moteur (4 temps 4 cylindres) fournit une puissance effective de 52 KW à un régime de 4200 tr.min<sup>-1</sup>. La cylindrée totale de ce moteur est de 2 l. Le rendement mécanique de ce moteur est estimé à 0.85.

- 1- Calculer la pression moyenne effective  $Pme$  (en pascal et en bar).
- 2- Calculer la pression moyenne indiquée  $Pmi$ .
- 3- Calculer la puissance indiquée  $Pi$ .

**Solution 4**

- 1- la pression moyenne effective  $pme$  (en pascal et en bar).

$$P_{eff} = pme * Cyl * \frac{N}{2 * 60}$$

$$pme = \frac{P_{eff} * 2 * 60}{Cyl * N} = \frac{52000 * 2 * 60}{2 * 10^{-3} * 4200} = 742857,1 \text{ pa} = 7,428 \text{ bar}$$

- 2- Calculer la pression moyenne indiquée  $pmi$ .

$$\eta_m = \frac{pme}{pmi}$$

$$pmi = \frac{pme}{\eta_m} = \frac{7,428}{0,85} = 8,73 \text{ bar}$$

- 3- Calculer la puissance indiquée  $Pi$ .

$$\eta_m = \frac{P_{eff}}{Pi}$$

$$Pi = \frac{P_{eff}}{\eta_m} = \frac{52000}{0,85} = 61176 \text{ watt}$$

## **Chapitre IV : Respiration ; modes opératoires, aspiration et suralimentation**

### **IV.1. Aspiration dans un moteur à combustion interne**

Dans le premier temps du cycle est l'aspiration (admission) : la soupape d'admission est ouverte

#### **IV.1.1. Aspiration dans un moteur à essence**

Le mélange, air et carburant, est aspiré dans la chambre de combustion.

#### **IV.1.2. Aspiration dans un moteur Diesel**

Le premier temps est l'admission : le cylindre aspire de l'air pur par la soupape d'admission, dès que l'air est comprimé, on injecte le Diesel en fin de phase d'admission.

### **IV.2. Utilité d'un mode de respiration plus performant**

Le moteur à combustion interne n'a pas de très bon rendement avec le mode d'aspiration classique (par le mouvement des pistons), à cet effet, plusieurs solutions ont été proposées permettant d'augmenter la puissance spécifique de ce moteur. L'augmentation du régime de rotation du moteur est une solution utilisée en compétition, cette technique entraîne des usures multiples dans le moteur et réduit cependant sa durée de vie. La consommation du moteur ainsi que la pollution augmentent lors de l'utilisation de cette technique, tous ces désavantages diminuent la fiabilité, et la rendent incapable d'obéir aux normes actuelles de construction des moteurs automobiles.

Une solution plus facile consiste à augmenter la cylindrée du moteur, par augmentation de la cylindrée unitaire ou bien du nombre des cylindres. L'augmentation de la masse, l'encombrement du moteur, ainsi que la consommation sont des

conséquences qui pénalisent cette technique. Une autre solution plus fiable, envoyer plus d'air dans le moteur. Au lieu de se limiter à l'aspiration naturelle du moteur, on ajoute un système qui va en plus "souffler" beaucoup d'air à l'intérieur. Cette technique est appelée suralimentation.

### **IV. 3. Suralimentation d'un moteur**

la suralimentation est un procédé qui vise à augmenter le rendement d'un Moteur à combustion interne, sans augmenter sa vitesse de rotation. Cette technique va permettre d'envoyer plus d'air dans le moteur. Au lieu de se limiter à l'aspiration naturelle du moteur, on ajoute un système qui va en plus "souffler" beaucoup d'air à l'intérieur. De cette manière, on peut alors aussi augmenter la quantité de carburant et donc la combustion. Un turbo marche bien dans les hauts régimes car il s'alimente par les flux d'échappement (plus importants à haut régime).

La suralimentation permet :

- D'améliorer le remplissage des cylindres
- De diminuer la pollution
- D'augmenter le couple du moteur

La suralimentation est fondée sur l'utilisation d'un compresseur ou d'un turbo sur échappement. A titre d'exemple, La puissance spécifique des moteurs passe de 55cv/l à des valeurs dépassant les 100cv/l grâce à différentes solutions améliorant le remplissage.

#### **IV. 3.1. Différents types de suralimentation**

Plusieurs techniques de suralimentation ont été utilisées pour augmenter le rendement d'un moteur à combustion interne

##### **IV.3.1.1. Le turbocompresseur**

Le turbocompresseur, plus communément appelé « turbo », est le système de suralimentation le plus utilisé au monde dans le secteur automobile. Le turbo fonctionne comme une pompe centrifuge. Sous l'effet de la force centrifuge, due à une vitesse de

rotation élevée ( $\sim 150\,000$  tr/min) l'air d'aspiration est chassé vers la périphérie de la roue du compresseur, ce qui entraîne une aspiration en son centre (Fig. IV.1).

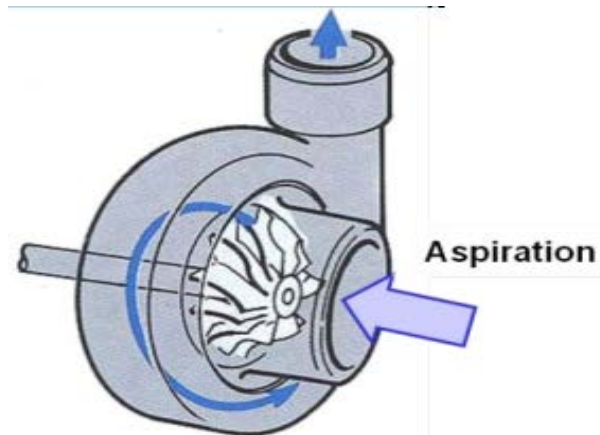


Fig. IV.1 Turbocompresseur

Une fois cette turbine en action, elle compressera l'air, qui sera ensuite dirigé vers les chambres de combustion. Le mélange air-essence étant ainsi plus oxygénée, les explosions générées par les pistons seront plus fortes et donneront au moteur plus de puissance. Le flux de gaz d'échappement entraîne la turbine «1» (Fig. IV.2). Le mouvement se transmet directement au compresseur «2» par un axe de liaison. Le compresseur alimente le moteur en air sous pression

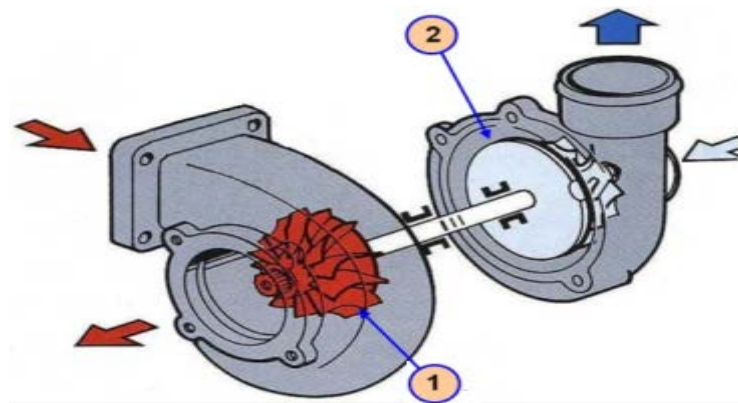


Fig. IV.2 L'entraînement d'un turbocompresseur

La circulation des gaz d'échappement et le gaz comprimé par le Turbocompresseur sont présentés sur les figures IV. a et b.

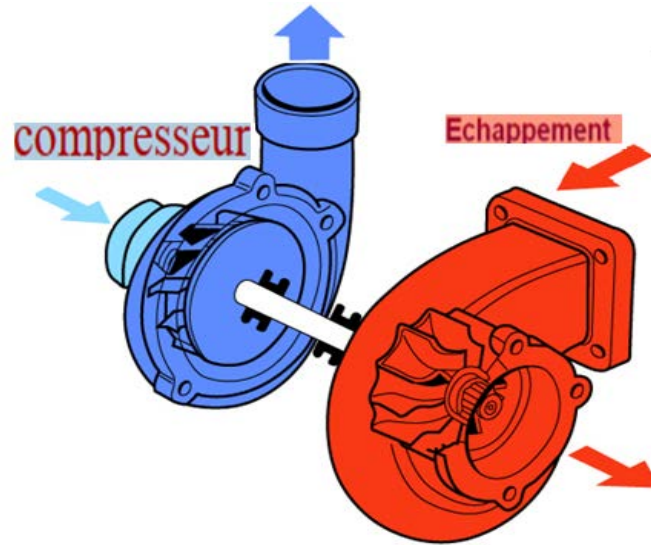


Fig. IV. 3. a Circulation des gaz

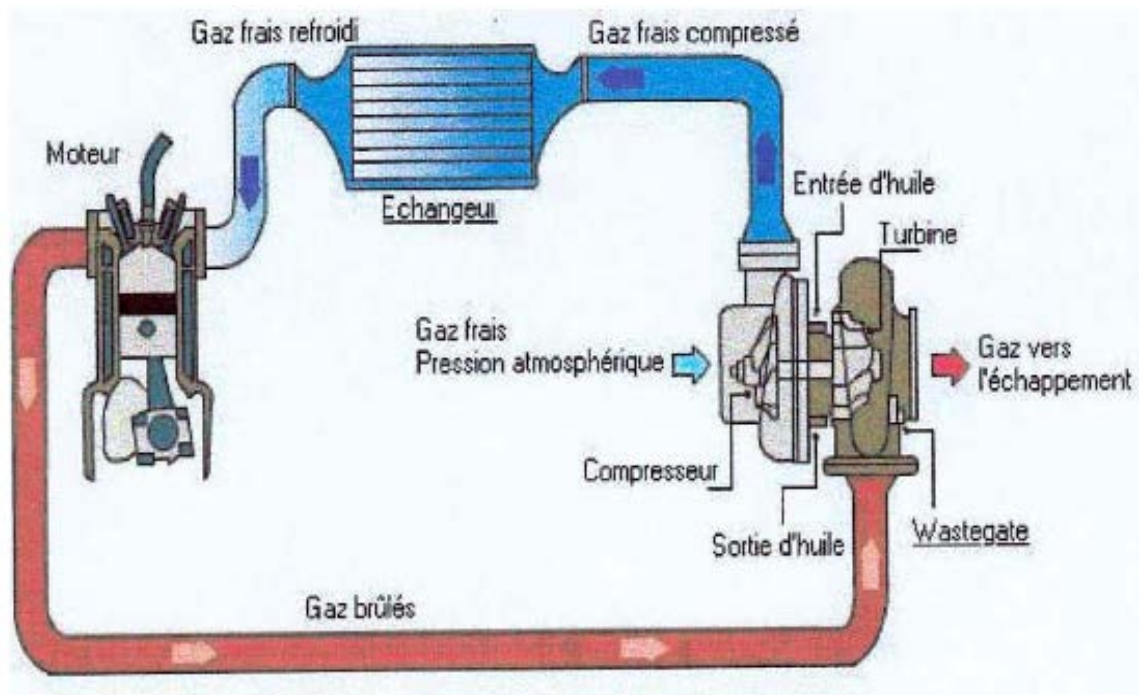


Fig. IV. 3. b Circulation des gaz

Avec le fonctionnement normal, le remplissage du moteur est fortement lié à l'efficacité du turbocompresseur, plus le remplissage du moteur augmente, plus le turbo est efficace. Plus le turbo est efficace, plus le remplissage augmente. Les gaz d'échappement entraînent le turbocompresseur à comprimer l'air pendant la phase d'admission pour les moteurs Diesel (mélange pour le moteur à allumage commandé) et les conduisent vers la chambre de combustion (Fig. IV.4).

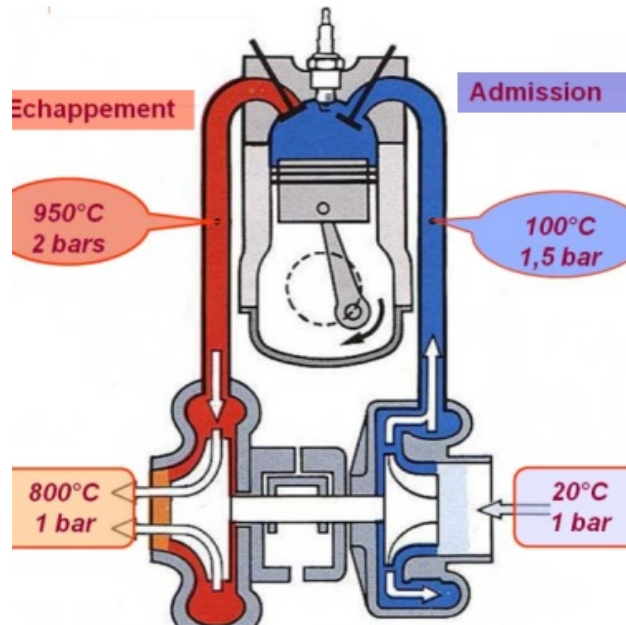


Fig. IV.4 Liaison l'échappement et l'admission dans un turbo compresseur

Quand la pression désirée est atteinte, une dérivation «1» contrôlée par une soupape «2» diminue le flux de gaz d'échappement sollicitant la turbine du turbo limitant ainsi sa vitesse de rotation (Fig. IV.5).

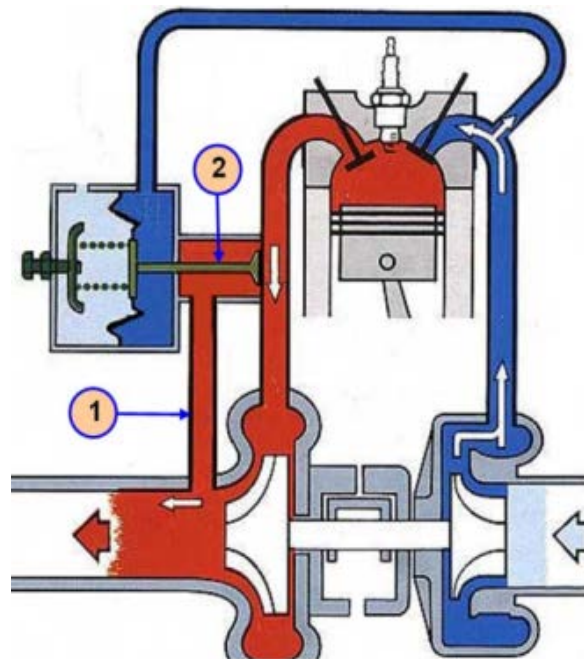


Fig. IV.5 Contrôle de la vitesse de rotation du turbo compresseur

#### IV.4. Suralimentation refroidie

L'augmentation de la pression d'admission entraîne une augmentation importante de la température du mélange ( $20^{\circ}\text{C}$  à l'entrée du turbo,  $> 100^{\circ}\text{C}$  à la sortie). L'amélioration du remplissage n'est pas aussi importante qu'elle puisse l'être. Le refroidissement de l'air ( $T^{\circ}$  admission  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ ) à l'aide d'un échangeur améliore les performances de la suralimentation (Fig. IV.6). Chaque abaissement de  $10^{\circ}\text{C}$  de la température d'admission permet une augmentation de puissance de  $\sim 3\%$ .

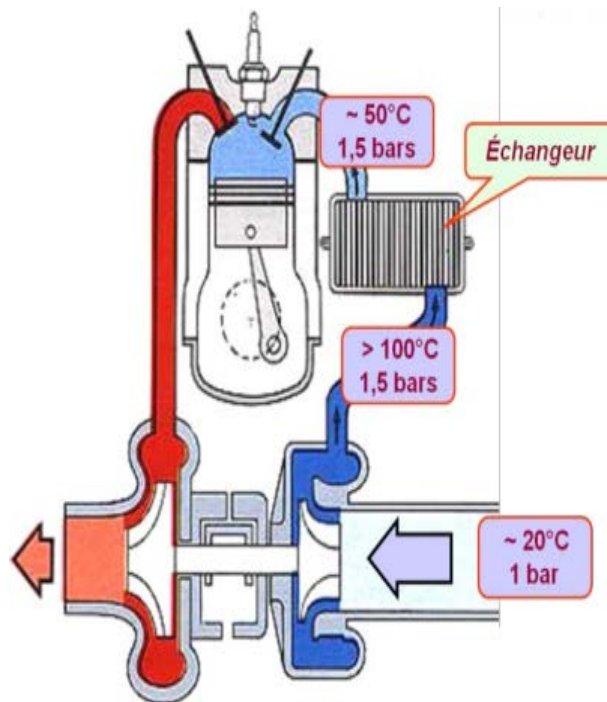


Fig. IV.6 Suralimentation refroidie

---

## Chapitre V : Frottements, architecture générale, dimensions principales

### V.1. Frottement

D'une manière générale, le frottement est une interaction qui s'oppose au mouvement relatif entre éléments en contact de surface d'un moteur entraînant une dissipation de puissance. Ce phénomène est causé par les irrégularités d'une surface d'une pièce en mouvement par rapport à une autre. Bien qu'une surface puisse paraître lisse à l'œil nu, des petites aspérités (des irrégularités) sont présentes sur la surface d'un objet lorsqu'on le regarde au microscope. Dans un moteur à combustion interne, le frottement provoque :

- Echauffement et une dilatation des pièces (grippage).
- Une usure des surfaces en contact (arrachement des particules de métal)
- Une diminution du rendement mécanique.
- Dégradation de l'état de surface des pièces en contact

La force de frottement  $F_f$  se calcule en fonction de la force motrice  $F_m$  et la force résultante  $F_m$  par la formule comme suit :

$$F_f = F_m + F_R \quad (V.1)$$

La puissance dissipée  $F_{méc}$  sous l'effet de frottement es sous la forme suivante :

$$P_{méc} = P_{in} - P_{eff} \quad (V.2)$$

D'où le rendement mécanique :

$$\eta_{méc} = \frac{P_{eff}}{P_{in}} \quad (V.3)$$

### V.1.1. Réduire l'effet du frottement

Il existe de nombreux types de procédés et de méthodes pour réduire l'effet de frottement dans un moteur à combustion interne. Les méthodes les plus utilisées :

- Par le choix des matériaux : matériaux antifriction
- Par rectification en amélioration des états de surfaces
- Par l'utilisation de roulements,
- Par graissage
- Par polissage des surfaces des surfaces en contact jusqu'à une finition lisse.

### V.2. Architecture générale

L'architecture générale du moteur est présentée par sur la figure V.1 par une vue éclatée

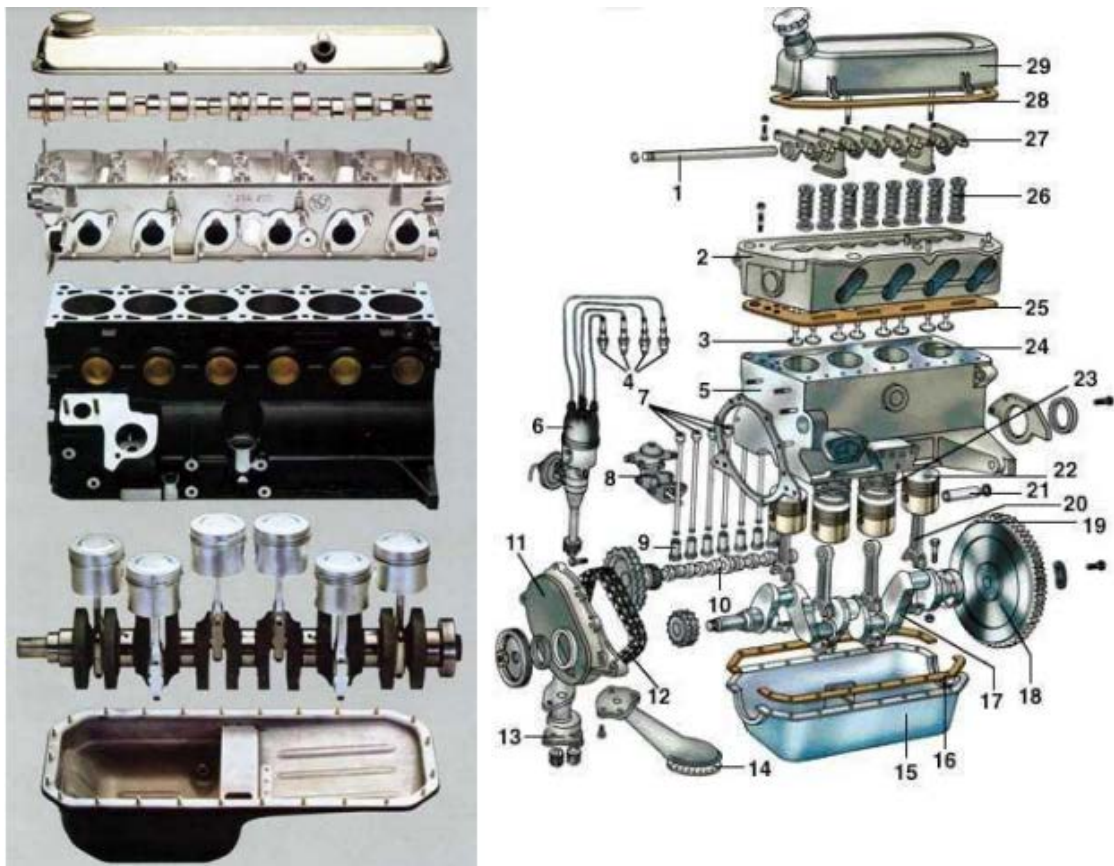


Fig. V.1 Vue éclatée d'un moteur à combustion interne

### V.2.1. Composition d'un moteur à combustion interne

Un moteur à combustion interne est composé de deux parties principales :

- **Parties fixes** : comprennent principalement :
  - Le bloc moteur ou bloc cylindre
  - La culasse supportant les éléments de la distribution (arbre à cames, soupapes,..) et servant de couvercle hermétique au bloc
- **Parties mobiles** : comprennent deux parties essentielles :
  - L'attelage mobile composé de vilebrequin, des bielles et des pistons dotés de leurs segments
  - La distribution incluant : l'arbre à came, les soupapes munies de leurs ressorts de rappel, chaînes ou courroies crantées

### V.3. Dimensions principales

Les dimensions principales du moteur, c'est-à-dire à la course du piston ( $c$ ) et à l'alésage du cylindre ( $D$ ) (Fig. V.2)

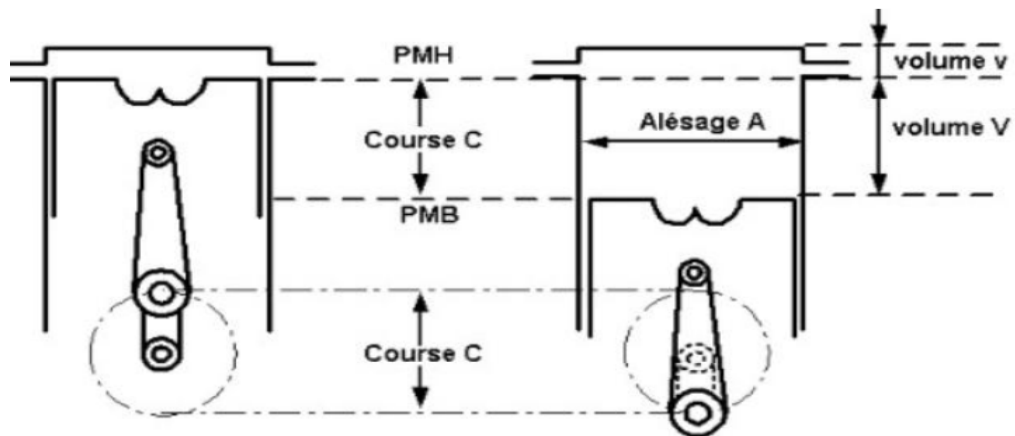


Fig. V.2 Dimensions principales d'un moteur

- **Alésage** : C'est le diamètre des cylindres exprimés en millimètres. Il varie de 90 à 150 mm environ.
- **Course** : C'est la distance parcourue verticalement par le piston entre le Point Mort Haut (PMH) et le Point Mort Bas (PMB) qui varie de 90 à 179 mm environ. L'alésage est généralement inférieur à la course. S'ils sont identiques, le moteur est appelé "carré". Si l'alésage est supérieur à la course, il est appelé

"super-carré". La tendance actuelle est aux moteurs ayant une course supérieure à l'alésage.

On définit d'autres paramètres liés aux dimensions du MCI :

- **Cylindrée** : Le volume engendré par le déplacement du piston entre ses points morts (PMH PMB) s'appelle la cylindrée unitaire. La cylindrée unitaire multipliée par le nombre de cylindres donne la cylindrée du moteur. Elle varie de 3 à 17 litres. En raison du développement de la suralimentation, les cylindrées moyennes des moteurs modernes sont en diminution.
- **R** le rayon de la manivelle
- **L** la longueur de la bielle
- Le rapport bielle/rayon manivelle  $\lambda = L/R$
- **Remarques**
- La course du piston vaut deux fois le rayon (R).
- La longueur (L) de bielle n'a pas d'incidence sur la course.
- Pour les moteurs Diesel  $\lambda = 3.63$  à  $4.20$ .
- Pour les moteurs à essence  $\lambda = 3.8$  à  $4.5$

#### V.4. Exercices corrigés

##### Exercice 1

Un moteur (4 temps, 4 cylindres) possède une course de 80 et un alésage de 83 mm. Le rapport volumétrique de ce moteur est de 10,2 à 1.

1. Calculer la cylindrée unitaire de ce moteur  $V$ ,
2. Calculer la cylindrée totale.
3. Calculer le volume de la chambre de combustion  $v$ .

NB : exprimer les valeurs en  $\text{cm}^3$ ,  $\text{dm}^3$  et  $\text{m}^3$ .

##### Solution 1

$$1. V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot \frac{\pi \cdot 83^2}{4} \cdot 80 = 432848 \text{ mm}^3 = 432,8 \text{ cm}^3 = 0,0004328 \text{ m}^3$$

$$2. V_{\text{cyl}} = V \cdot N_{\text{br.cyl}} = 432848 \cdot 4 = 1731394 \text{ mm}^3 = 1731,4 \text{ cm}^3 = 1,7314 \text{ dm}^3 (\text{litre}) = 0,001731 \text{ m}^3$$

$$3. v = \frac{V}{\rho - 1} = \frac{432848}{10,2 - 1} = 47048 \text{ mm}^3 = 47,08 \text{ cm}^3 = 47,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

**Exercice 2**

Un moteur 4 cylindres de 1560 cm<sup>3</sup> possède un alésage de 84 mm. Le régime moteur est limité à 6000 tr.min<sup>-1</sup>. Le volume de la chambre est de 52 cm<sup>3</sup>.

1. Calculer la course  $L$ .
2. Calculer le rapport volumétrique  $\mathcal{E}$
3. Calculer la vitesse moyenne du piston au régime maxi. :  $V_{mp}$ .

**Solution 2**

1.  $V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot N_{br.cyl} \Rightarrow L = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot N_{br.cyl} \cdot D^2}$   $L = \frac{4 \cdot 1560000}{\pi \cdot 4 \cdot 84^2} = 70.37 \text{ mm}$
2.  $\rho = \frac{V+v}{v} = \frac{\left(\frac{1560}{4}\right) + 52}{52} = 8.5 \text{ à } 1$
3.  $V_{mp} = 2LN = 2 \cdot 70.37 \cdot 10^{-3} \cdot 6000 / 60 = 14 \text{ m/s}$

**Exercice 3**

Un moteur (4 temps 4 cylindres) fournit une puissance effective de 52 KW à un régime de 4200 tr.min<sup>-1</sup>. La cylindrée totale de ce moteur est de 2 l. Le rendement mécanique de ce moteur est estimé à 0.85.

1. Calculer la pression moyenne effective  $P_{me}$  (en pascal et en bar).
2. Calculer la pression moyenne indiquée  $P_{mi}$ .
3. Calculer la puissance indiquée  $P_i$ .

**Solution 3**

1.  $P_{eff} = P_{me} \cdot V_{cyl} \cdot \frac{N}{2 \cdot 60}$  donc,  $P_{me} = \frac{P_{eff} \cdot 2 \cdot 60}{V_{cyl} \cdot N} = \frac{52000 \cdot 2 \cdot 60}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 4200} = 742857.1 \text{ pa} = 7.428 \text{ bar}$
2.  $\eta_m = \frac{P_{me}}{P_{mi}} \Rightarrow P_{mi} = \frac{P_{me}}{\eta_m} = \frac{7.428}{0.85} = 8.73 \text{ bar}$
3.  $P_i = \frac{P_{eff}}{\eta_m} = \frac{52000}{0.85} = 61176 \text{ W}$

**Exercice 4**

Un moteur (4 temps 4 cylindres) :

- développe une puissance effective de 150KW à un régime de 5500 tr.min<sup>-1</sup>.
- A un rendement effectif de ce moteur est de 0.28.

- 
- Utilise un carburant dont le pouvoir calorifique inférieur du carburant utilisé est de  $42\text{KJ.g}^{-1}$  et de masse volumique  $850\text{ kg.m}^{-3}$
1. Calculer la consommation spécifique de ce moteur  $C_s$  en  $\text{g/KW.h}$ .
  2. Calculer la consommation horaire  $C_o$  de ce moteur en  $\text{g.h}^{-1}$ .
  3. Calculer la consommation en  $\text{l.h}^{-1}$  (litre par heure).

**Solution 4**

1.  $\eta_{\text{eff}} = \frac{3.6*}{C_s.P_{ci}} \Rightarrow C_s = \frac{3.6*10^9}{\eta_{\text{eff}} * P_{ci}} = \frac{3.6*10^9}{0.28 * 42 * 10^6} = 306.1\text{ g/kWh}$
2.  $C_o = C_s.P_{\text{eff}} = 45915\text{ g/h} = 45.915\text{ kg/h}$
3.  $C_{\text{onso}} = C_o / \rho_{\text{carburant}} = 54\text{ l/h}$

## **Chapitre VI : Propriétés du combustible et étude des modes de combustion**

### **Introduction**

L'apport d'énergie thermique est obtenu par combustion de l'oxygène de l'air et du combustible d'origine organique. Selon la nature et les caractéristiques du combustible, la préparation du mélange réactif à l'intérieur du cylindre, la quantité de chaleur dégagée est fortement liée aux types du carburant, par conséquent, le rendement et le travail fourni.

Le combustible doit avoir certaines propriétés physiques et chimiques, les propriétés physiques telles que la densité et la viscosité ont une influence sur le mode d'introduction du combustible dans la chambre de combustion et sur la formation du mélange. Les propriétés chimiques comme la structure et la liaison moléculaire ainsi que la rapidité d'inflammation, ont une influence sur l'introduction du combustible vers le cylindre et sur la formation du mélange et sur le processus de déclenchement de la réaction chimique de la combustion.

### **VI.1. Indices caractérisant le type de combustible**

Selon les deux catégories de moteurs à combustion interne, Les combustibles se répartissent en deux indices, l'un pour le combustible des moteurs Diesel, l'autre, pour le combustible des moteurs à essence.

### VI.1.1. Indice de cétane pour les moteurs Diesel

Le cétane ou hexadécane ( $C_{16}H_{34}$ ) est un hydrocarbure saturé de la famille des alcanes (Fig. VI.1). Il possède 16 atomes de carbone et 34 atomes d'hydrogène. Il entre dans la composition du gazole. On parle d'ailleurs de l'indice de cétane du gazole pour les moteurs Diesel. L'indice de cétane définit la capacité d'un carburant à s'enflammer sur une échelle de 0 à 100. Le carburant doit s'auto-enflammer sous l'effet de la compression. Un carburant à haut indice de cétane est caractérisé par sa facilité à s'auto-allumer.

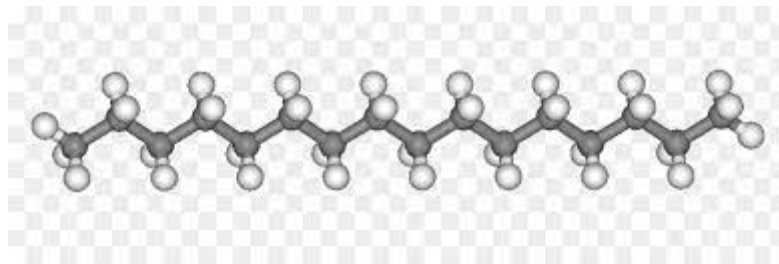


Fig. VI.1 Hexadécane

Dans les moteurs diesels le nombre de cétane du combustible est choisi en fonction du taux de compression de telle façon que le déclenchement de la combustion doit être assuré sur tous les régimes de fonctionnement du moteur. En particulier, la valeur du taux de compression doit assurer le lancement du moteur à froid et le fonctionnement normal du moteur à bas régimes, où la température et la pression dans le cylindre en fin de compression ne sont pas assez grandes.

### VI.1.2. Indice d'octane pour les moteurs à essence

L'indice d'octane (octane  $C_8H_{18}$ ) mesure la résistance à l'auto-allumage ; c.-à-d. allumage sans intervention de la bougie. On parle assez souvent improprement de capacité antidétonante du carburant pour un carburant d'indice d'octane élevé, un carburant ayant tendance à l'auto-allumage pouvant dans certains cas transiter à la détonation. On dit qu'un carburant a un indice d'octane de 95 par exemple, lorsque celui-ci se comporte, au point de vue auto-allumage, comme un mélange de 95 % d'isooctane qui est résistant à l'auto-inflammation (son indice est de 100 par définition) et de 5 % de n-heptane, qui lui s'auto-enflamme facilement (son indice est de 0 par définition).

## VI.2 Amélioration des indices d'octane

En cas d'utilisation d'un carburant à indice d'octane trop faible (par rapport aux caractéristiques du moteur), le combustible risque de s'enflammer spontanément lors de la compression dans le cylindre. Ce phénomène fatigue l'embellage et le vilebrequin et est source d'un bruit dit cliquetis. Pour y remédier, les fabricants de carburant ont dû introduire dans l'essence des additifs chimiques antidétonant permettant son utilisation dans des moteurs à plus haut taux de compression, et donc potentiellement à plus haut rendement (l'additif le plus utilisé est le tétra éthyle de plomb. Il est maintenant interdit dans la législation

## VI.3. Modes de combustion

### VI.3.1. Moteur à allumage commandé

Le mélange comprimé air-carburant est enflammé dans chambre de combustion à provoqué par l'étincelle électrique entre les deux électrodes de la bougie. Le timing de l'allumage est contrôlé par l'instant de cette décharge, d'où le terme d'allumage commandé (AC). La combustion se développe progressivement par propagation d'un front de flamme qui consomme les gaz frais (Fig. VI.2). Ce front de flamme réchauffe les gaz frais situés juste devant lui par diffusion thermique, ce qui déclenche les réactions chimiques de combustion, tandis que l'arrière du front de flamme cesse de brûler après consommation totale des réactifs.

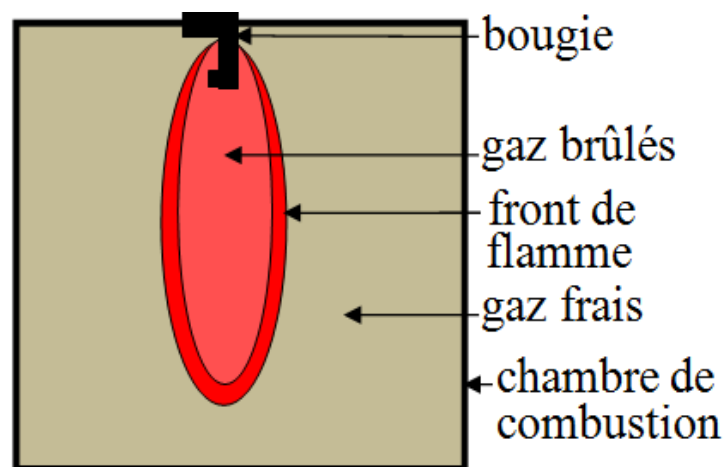


Fig. VI.2 Propagation de la flamme dans un moteur à essence

### VI.3.2. Moteur à allumage par compression

Dans les moteurs Diesel, l'air est comprimé, ensuite, à haute pression (plusieurs centaines voire milliers de *bar*), le carburant est injecté (pulvérisé) sous forme d'un jet près du PMH dans la chambre de combustion. Dans une première phase transitoire, le carburant sort de l'injecteur s'évapore et s'auto-allume après un certain temps appelé délai d'auto-inflammation. Une fois la combustion démarre, le jet se stabilise. Un gradient de richesse s'établit entre le centre du jet (quasiment entièrement du carburant) et les zones périphériques. La zone réactive s'établit sur une zone de richesse intermédiaire, et se stabilise quand l'apport de carburant par diffusion depuis le cœur riche compense la consommation par réactions chimiques (Fig. VII.3).

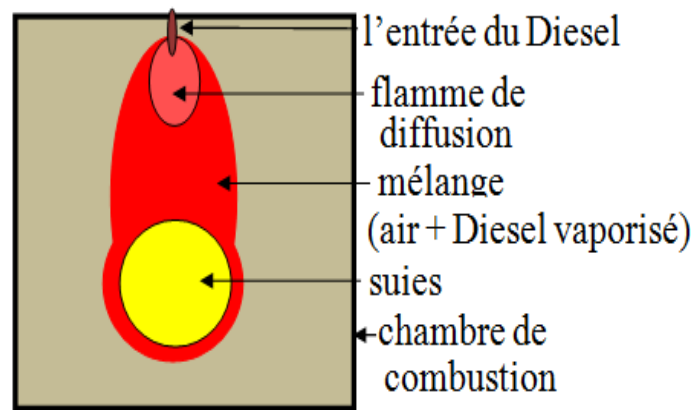


Fig. VI.3 Propagation de la flamme dans un moteur Diesel

Une caractéristique importante de la combustion Diesel est la distance de lift-off (*lift-off length* ou LoL) du spray, c'est-à-dire la distance moyenne entre l'injecteur et la base de la flamme stabilisée. Cette distance détermine les échelles géométriques du jet.

### VI.3.3. Moteur à charge stratifiée

On dit qu'un moteur à combustion fonctionne en mode charge stratifiée lorsque ce dernier n'utilise pas l'ensemble de la chambre de combustion pour la combustion du mélange mais utilise une technique d'injection qui permet de créer un mélange riche autour du point d'allumage de la bougie, puis d'allumer ce mélange. Initialement le mode charge stratifiée est utilisé quand le moteur fonctionne à bas régime et faible charge. Grâce à l'injection directe d'essence, on arrive à injecter au moment Compression (contrairement au moment admission en mode homogène), ce qui a pour effet (comme cité auparavant) de créer un

mélange riche autour des électrodes de la bougie mais qui est isolé du reste de la paroi de la chambre de combustion par un mélange trop pauvre pour être enflammé et par des résidus de la combustion précédente (Fig. VI.4).

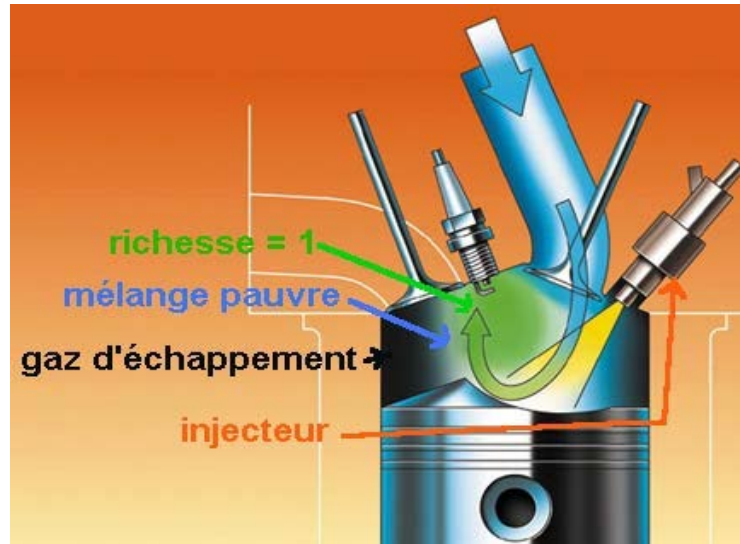


Fig. VI.4 Moteur à charge stratifiée

Une partie de l'énergie de combustion est perdue en chaleur, le fait d'isoler la combustion de la paroi de la chambre sert à limiter ces dites pertes. Aussi, en mode stratifié, le moteur fonctionne en excès d'air (papillon ouvert au maximum), ce qui sert à diminuer largement les pertes par pompage. L'effet final est une baisse appréciable de la consommation de carburant en mode stratifié de l'ordre de 15%.

Pour des raisons de pertes de puissance, le moteur ne peut fonctionner exclusivement en mode stratifié, car ce dernier est soumis bien entendu à des changements de charge et de régime. Cela implique le passage du mode stratifié au mode homogène (ou le contraire) durant la marche du véhicule sans que le conducteur ne s'en rende compte, strict une maîtrise totale des différents paramètres de combustion. Aussi le problème de l'injection directe (obligatoire pour le mode stratifié) est une augmentation des rejets de certaines particules, actuellement le problème est contourné en utilisant un dispositif de dépollution particulièrement élaboré

#### VI.3.4. Moteur à duel fuel

Le système Dual Fuel Diesel + Méthane est le nouveau système à injection conçu pour la conversion des moteurs Diesel des véhicules commerciaux et des véhicules de transport

public en moteurs à même de fonctionner avec un mélange de gazole et de méthane. L'électronique sophistiquée dédiée gère le mélange des deux carburants en privilégiant l'emploi du gaz et en utilisant tous ses avantages. La centrale Diesel Dual Fuel calcule en temps réel la quantité de gazole à réduire et celle qu'il faut injecter, en obtenant une combustion énergétiquement équivalente et moins polluante que celle d'origine, tout en réduisant la consommation, les coûts d'utilisation et en préservant la durée et les performances d'origine du moteur (Fig. IV.5).

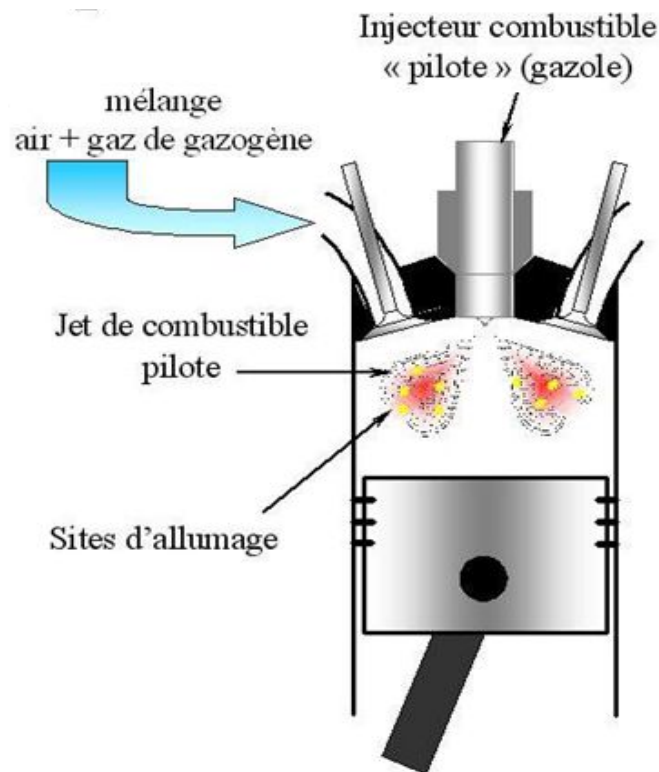


Fig. VI.5 Allumage à Duel fuel

#### VI.4. Phénomène du cliquetis

Le phénomène de cliquetis est associé au moteur à allumage commandé sous certaines conditions thermodynamiques. Une partie des gaz frais peut s'auto-enflammer avant d'être atteinte par le front de flamme. Cette auto-inflammation entraîne la propagation d'ondes acoustiques qui peuvent endommager le moteur et qui sont caractérisées expérimentalement par des oscillations de pression dans la chambre à des fréquences. Dans les cas extrêmes, cette auto-inflammation peut arriver avant même que l'allumage par la bougie n'ait été déclenché, on parle alors de pré-allumage.

---

**VI.5. Exercice corrigés****Exercice 1**

Dans une combustion complète, un moteur à essence consomme 7,91 l pour 100 km un volume d'un alcane ( $C_6H_{14}$ ). La densité de l'alcane  $750 \text{ kg/m}^3$

1. Calculer la masse d'essence consommée pour 100 km
2. Déduire le pouvoir calorifique massique  $P_{cm}$  de l'alcane
3. Le pouvoir calorifique molaire de l'essence  $P_C=4200 \text{ kJ/mol}^{-1}$ , quelle est la chaleur fournie par la combustion  $Q$  en kJ?

**Solution 1**

1.  $m=\rho V=750 \cdot 7,91=5938,09 \text{ g}=5,93809 \text{ kg}$
2.  $P_{cm}=P_C/M=4200/86=48,83 \text{ kJ/g}$
3.  $Q=m \cdot P_{cm}=5938,09 \cdot 48,83=289999,74 \text{ kJ}$

**Exercice 2**

Que représente l'indice d'octane d'un carburant ?

**Solution 2**

L'indice d'octane représente le pouvoir anti détonant du carburant. Plus l'indice d'octane est élevé plus le carburant résiste au phénomène de cliquetis.

**Exercice 3**

Un moteur 4 cylindres, alésage 86 mm et course 84 mm, fonctionne à un régime de rotation de  $5000 \text{ tr.min}^{-1}$  et délivre alors un couple de 154 m.N. Son rapport volumétrique est de 9.2 à 1. Le moteur fonctionne avec une richesse de 1,25. Le carburant utilisé a un pouvoir calorifique inférieur de  $42 \text{ KJ.g}^{-1}$ . La masse volumique du carburant est de  $750 \text{ kg.m}^{-3}$ . On ne considère que le coefficient de pertes dues aux soupapes est  $=0,8$ . La pression d'admission est de 98000 pascals et la température de l'air est de  $20^\circ\text{C}$ . Le rendement de combustion est de 0.9 et le rendement mécanique est de 0.85. Calculer :

1. La puissance effective du moteur (en watt et en ch) :  $P_{eff}$ .
2. Le débit masse réel d'air consommé par le moteur :  $q_{mair}$
3. Le débit masse de carburant injecté :  $q_{mess}$
4. La puissance calorifique théorique du carburant injecté :  $P_{cal th}$

5. La puissance calorifique due à la combustion :  $P_{comb}$ .
6. Le rendement théorique  $\eta_{th}$

**Solution 3**

$$P_{eff} = C \cdot \omega = 154.5000 \cdot 2 \cdot \pi / 60 = 80593 \text{ W} = 109.5 \text{ ch}$$

$$Q_m = V \cdot \frac{P_{admission}}{r \cdot T_{admission}} \cdot Kr \cdot \frac{N_{moteur}}{2260} =$$

$$V = \frac{\pi \cdot A^2}{4} \cdot L \cdot N_{cyl} = \frac{\pi \cdot 86^2}{4} \cdot 84 \cdot 4 = 1951758 \text{ mm}^3 = 1.952 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$Q_m = 1.952 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{98000}{286 \cdot (273 + 20)} \cdot 0.8 \cdot \frac{5000}{2 \cdot 60} = 0.076 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$R = \frac{\frac{m_{ess}}{m_{air}}}{\frac{1}{15}} = \frac{\frac{q_{m_{ess}}}{q_{m_{air}}}}{\frac{1}{15}} \quad q_{m_{ess}} = \frac{R}{15} \cdot q_{m_{air}} = \frac{1,25 \cdot 0,076}{15} \quad q_{m_{ess}} = 0.0063 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

La puissance calorifique théorique du carburant injecté :  $P_{cal th}$

$$P_{cal th} = q_{m_{ess}} \cdot p_{ci} = 0.0063 \cdot 42 \cdot 10^6$$

$$P_{cal th} = 264600 \text{ W}$$

La puissance calorifique due à la combustion :  $P_{comb}$ .

$$P_{comb} = \eta_{comb} \cdot q_{m_{ess}} \cdot p_{ci} = 0.9 \cdot 264600$$

$$P_{comb} = 238140 \text{ W}$$

Le rendement théorique du cycle (beau de Rochas) choisi pour modéliser le fonctionnement de ce moteur  $\eta_{th}$ .

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\rho^{\gamma-1}}$$

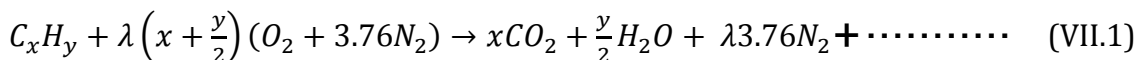
## Chapitre VII : Etudes des anomalies et optimisation des lois de combustion

### VII.1. Etude des anomalies

La combustion est dite stœchiométrique, lorsqu'il y a exactement assez de comburant pour oxyder totalement le combustible. Les fumées produites de cette combustion ne contiennent ni oxygène, ni combustible, donc, c'est une combustion complète sans excès ou défaut d'air. Lorsque la combustion n'est pas stœchiométrique, on peut la définir de plusieurs manières, généralement par son excès d'air  $e$ , ou son défaut d'air ( $-e$ ), ou bien par la richesse  $R$ , ou son inverse le facteur d'air  $\lambda$ .

#### Exemple :

La combustion complète d'un hydrocarbure  $C_xH_y$  en présence de l'oxygène de l'air ( $O_2$  21% +  $N_2$  78%) représentée par l'équation de la réaction suivante :



La combustion stœchiométrique conduit à la température de combustion la plus élevée. Par conséquent, elle est considérée comme combustion idéale. Lorsque la combustion est stœchiométrique on dit que le facteur d'air  $\lambda=1$ .

La richesse

$$R = \frac{1}{\lambda} \quad (VII.2)$$

Le défaut d'air

$$e=1-\lambda \quad (VII.3)$$

Selon la figure VII.1, on distingue donc

- $\lambda > 1$ , La combustion est oxydante ou en excès d'air si une partie de l'air comburant est utilisé pour l'oxydation du combustible, l'autre partie se retrouvant dans les fumées.
- $\lambda < 1$ , La combustion est dite réductrice ou en défaut d'air si le volume d'air admis pour la combustion de l'unité de combustible est inférieur au volume d'air stœchiométrique ; l'oxygène y est néanmoins totalement utilisé donc pas de présence d'O<sub>2</sub> dans les fumées, mais il y a formation de monoxyde de carbone (CO).

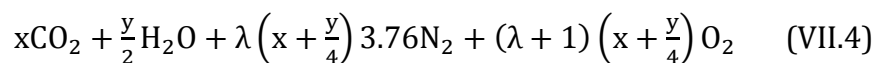
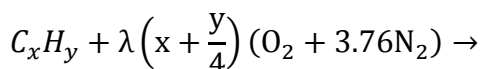


Fig. VII.1 Echelle du facteur d'air

## VII.2. Optimisation des lois de combustion

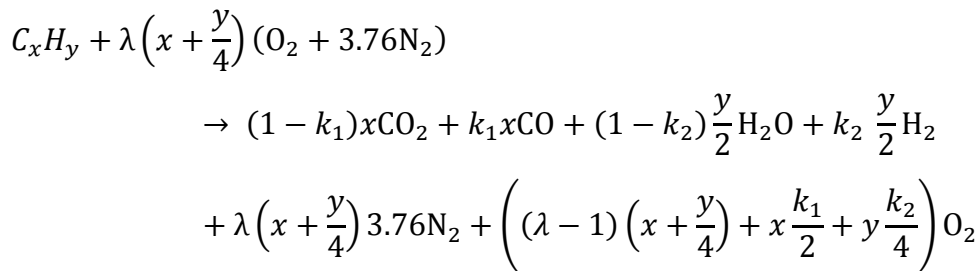
En introduisant le facteur d'air  $\lambda$  dans la réaction de combustion :

- En excès d'air on obtient :



L'analyse des fumées permet de définir la qualité des produits de la combustion. Notamment, la présence d'oxygène  $(\lambda + 1) \left( x + \frac{y}{4} \right) O_2$  caractérise une combustion en excès d'air  $\lambda > 1$ .

- Dans le cas de la combustion incomplète :



$k_1$  et  $k_2$  sont les constantes de dissociation du  $CO_2$  et de l'eau. -

Pour cette combustion incomplète  $k_1 \neq 0$  ou  $k_2 \neq 0$  il reste des espèces oxydées : CO,  $H_2$  ou  $C_xH_y$ , alors que pour une combustion complète  $k_1 = k_2 = 0$  toutes les espèces oxydables ont été oxydées en  $CO_2$  et  $H_2O$ .

Les causes principales de la présence d'imbrûlés dans les fumées sont dues à un :

- Mélange carburant-comburant non homogène  $\Rightarrow$  manque local d'oxygène
- Température trop basse  $\Rightarrow$  combustion peu réactive (cinétique lente)

Pour optimiser de la combustion (combustion complète), il faut répondre aux exigences en termes de performance, de consommation et de pollution, donc, il faut optimiser le mélange.

### VII.3. Exercices corrigés

#### Exercice 1

Une voiture équipée d'un moteur Diesel, consomme  $Q_{v,a}$  de 4,5 litres d'un alcane pour 100 km pour une combustion complète.

1. Ecrire l'équation de la réaction
2. Quel est la quantité  $Q_m$ , en kg de  $CO_2$  rejetée considérant la réaction comme stœchiométrique pour un trajet de 100 km?
3. Calculer la constante de conversion  $Ka$  du Diesel en g/l

On donne : ( $\rho = 0.85 \text{ kg/l}$ ,  $M(\text{alcane}) = 170 \text{ g/mole}$ ,  $M(CO_2) = 44 \text{ g/l}$ )

#### Solution 1

1.  $C_xH_{2y+2} + \left( x + \frac{y+1}{2} \right) (O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + (y + 1)H_2O + 3.76 \left( x + \frac{y+1}{2} \right) N_2$
2.  $m = \rho V = 3.825 \text{ kg}$  d'un alcane pour 100 km  
 $M(\text{alcane}) = 170 = 14x + 2 \Rightarrow x = 12$  (l'alcane  $C_{12}H_{26}$ )

$$Q_m = \frac{44 \cdot 12 \cdot 3.825}{170} = 11.88 \text{ kg pour } 100 \text{ km}$$

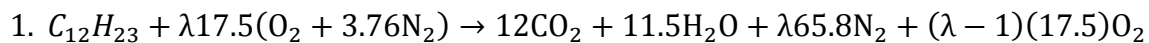
$$3. Ka = \frac{Q_m}{Q_{v,a}} = 2640 \text{ g/l}$$

### Exercice 2

Dans un moteur thermique, la combustion complète d'un hydrocarbure  $C_{12}H_{23}$  en présence de l'air.

1. Ecrire l'équation de combustion en fonction du coefficient d'air  $\lambda$
2. Déterminer les rapports Air/carburant (A/F) molaires et massiques relatifs à la combustion complète d'une
  - Une quantité d'air théorique  $\lambda = 1$ .
  - Une quantité d'air telle que  $\lambda = 1,5$

### Solution 2



$$2. - \lambda = 1$$

$$\frac{A}{F} (\text{molaire}) = \frac{n_{air}}{n_{C_{12}H_{23}}} = \frac{17.5 \cdot 4.76}{1} = 84.52$$

$$\frac{A}{F} (\text{massique}) = \frac{17.5 \cdot m_{air}}{m_{C_{12}H_{23}}} = \frac{17.5(32 + 3.76 \cdot 28)}{167} = 14.59$$

$$- \lambda = 1.5$$

$$\frac{A}{F} (\text{molaire}) = \frac{n_{air}}{n_{C_{12}H_{23}}} = \frac{1.5 \cdot 17.5 \cdot 4.76}{1} = 124.95$$

$$\frac{A}{F} (\text{massique}) = \frac{17.5 \cdot m_{air}}{m_{C_{12}H_{23}}} = \frac{1.5 \cdot 17.5(32 + 3.76 \cdot 28)}{167} = 21.885$$

## Chapitre VIII : Technologies d'alimentation et maîtrise des émissions polluantes

### VIII.1. Technologies d'alimentation

Le moteur doit être alimenté en air et en carburant. C'est le rôle des circuits d'alimentation. Le carburant et le comburant sont mélangés et dosés par le carburateur ou par les systèmes d'injection qui alimentent eux-mêmes le moteur ; ils assurent la carburation.

#### VIII.1.1. Dans les moteurs à essence

Le système d'admission de carburant et les injecteurs acheminent le carburant au moteur. Les injecteurs pulvérisent sous haute pression la quantité de carburant nécessaire à l'allumage dans les cylindres. La buse de l'injecteur est aussi petite que la tête d'une épingle et peut se boucher si de la saleté s'y loge.

Selon votre véhicule, il existe deux types de systèmes d'injection :

- **Injection dans l'orifice d'admission** : le carburant est pulvérisé dans les orifices d'admission, avant la chambre de combustion (Fig. VIII.1)
- **Injection directe** d'essence : le carburant est injecté directement dans la chambre de combustion pour une meilleure économie de carburant (Fig. VIII.2).

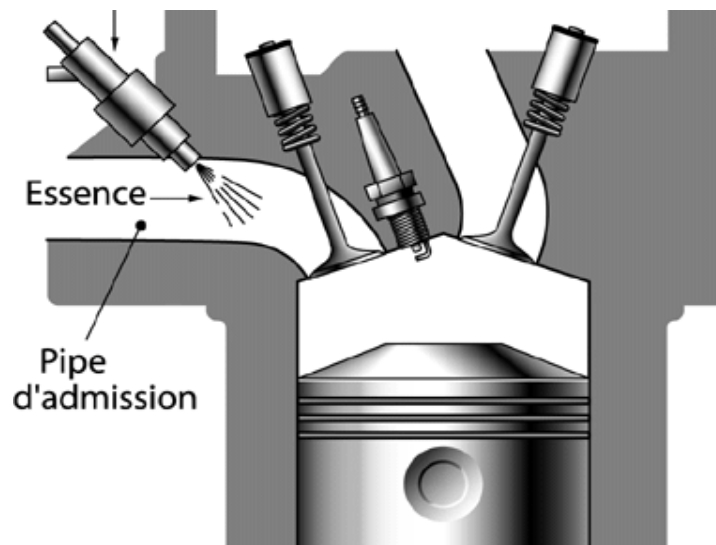


Fig. VIII.1 Injection de l'essence dans le canal d'admission

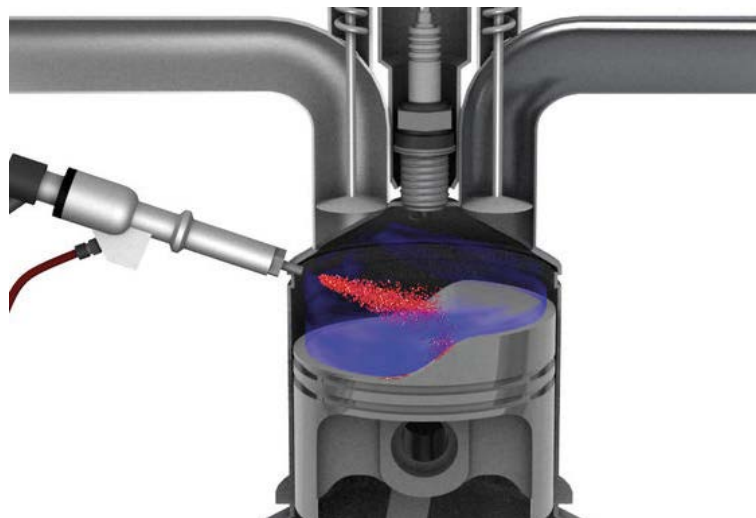


Fig. VIII.2 Injection directe de l'essence

### VIII.1.2. Dans les moteurs Diesel

Il existe deux principaux modes d'injection du carburant dans la chambre de combustion des moteurs diesel ; injection indirecte (IDI) et injection directe (DI)

- **Injection indirecte** : Le diesel est injecté dans une préchambre plutôt que directement dans la chambre de combustion, cette technique peut être décomposée en deux groupes. La conception "préchambre" et la conception de chambre "tourbillon" (ou turbulence) (Fig. VIII.3).

- **Injection directe** : Ce mode consiste à injecter le carburant directement dans la chambre de combustion. Les systèmes IDI offrent des avantages en matière d'émissions et de réduction du bruit du moteur. Aujourd'hui, les conceptions à injection directe ont remplacé les systèmes IDI (Fig. VIII.4). L'injection directe n'est utilisée qu'avec des systèmes d'injection à rampe commune. Grâce aux commandes électroniques et à l'injection haute pression, les nouveaux systèmes à rampe commune ont ouvert la voie à l'injection directe qui permet d'économiser jusqu'à 20% de carburant

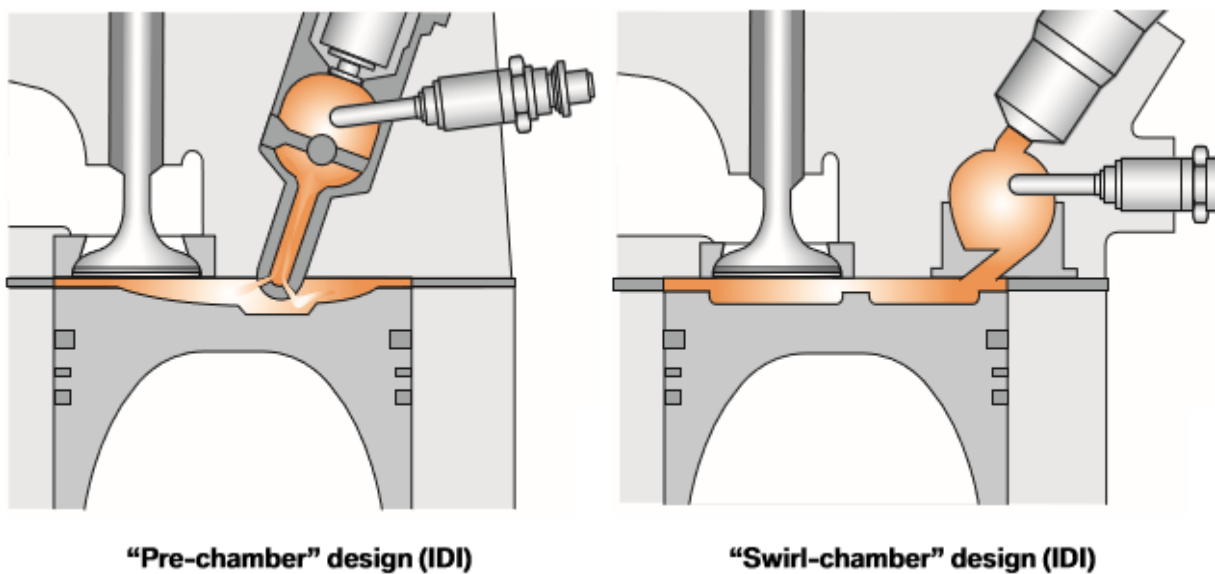


Fig. VIII.3 Mode d'injection indirecte (IDI)

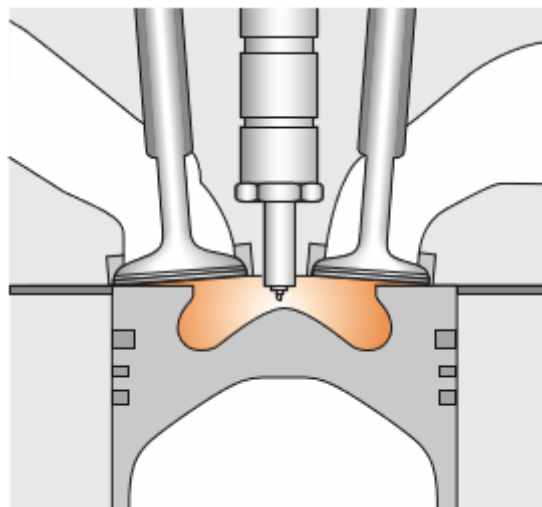


Fig. VIII.4 Mode d'injection directe (DI)

## VIII.2. Pollution de l'air par l'émission des moteurs thermiques

La pollution de l'air est la modification de la composition de l'air par des intrus (gaz et particules) nuisibles à la santé et à l'environnement.

La pollution de l'air est l'une des conséquences de la forte utilisation des véhicules et des moteurs thermiques, des gaz d'échappements dus à la combustion des hydrocarbures sont émis dans l'atmosphère. Bien évidemment, la nature et à l'importance des polluants, sont effectivement très divers et comprennent le monoxyde de carbone, des hydrocarbures imbrûlés, des produits d'oxydation partielle, des oxydes d'azote, des oxydes de soufre, des dérivés du plomb, des particules solides ou liquides constituant les fumées et des composés mal définis caractérisés par leur odeur. Les effets de la pollution de l'air sur la santé est très réponsus, irritation des voies et aggravations des maladies respiratoires, irritation des yeux, développement des cardiovasculaires.....

Améliorer la qualité d'air passe essentiellement par la maîtrise des émissions polluantes et réduire leurs sources. Cette opération impose des mesures nécessaires normalisées par l'état. L'application de ces Normes contraint les fabricants de moteurs à élaborer des technologies nouvelles, pour que les moteurs actuels puissent satisfaire à ces Normes et diminuent de dégagement des polluants. (Tableaux VIII.1 VIII.2 et VIII.3)

Tableaux des normes de qualité de l'Air

Tableau VIII.1

MONOXYDE de CARBONE (CO)		
Valeur limite pour la protection de la santé humaine	10 mg/m <sup>3</sup> soit 10 000 µg/m <sup>3</sup> <b>(FR)</b>	pour le maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures

Tableau VIII.2

OXYDES D'AZOTE (NO <sub>x</sub> )		
Niveau critique pour la protection de la végétation	30 µg eq NO <sub>2</sub> .m <sup>-3</sup>	en moyenne annuelle

Tableau VIII.3

OMS / UE / FR = origines des valeurs

DIOXYDE d'AZOTE (NO <sub>2</sub> )		
Objectif de qualité	40 µg/m <sup>3</sup> (FR)	en moyenne annuelle
Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	200 µg/m <sup>3</sup> (UE)	en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an
	40 µg/m <sup>3</sup> (UE)	en moyenne annuelle
Niveau critique pour la protection de la végétation (NO <sub>x</sub> )	30 µg/m <sup>3</sup> (UE)	en moyenne annuelle d'oxydes d'azote
Seuil d'information et de recommandation	200 µg/m <sup>3</sup> (FR)	en moyenne horaire
Seuils d'alerte	400 µg/m <sup>3</sup> (UE)	moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
	ou si 200 µg/m <sup>3</sup> en moyenne horaire à J-1 et à J et prévision de 200 µg/m <sup>3</sup> à J+1 (FR)	

### VIII.2.1. Réduction de la pollution en provenance des moteurs thermiques

La réduction des polluants passe par la maîtrise et le contrôle des constituants des gaz d'échappement. Il existe deux techniques anti-polluantes ; Réduction des émissions à la source et le traitement catalytique

#### VIII.2.1.1. Réduction des émissions à la source

Cette technique peut être appliquée aux deux types de moteurs à essence ou Diesel, mais il faudra réaliser des compromis :

- Soit entre l'émission globale de polluants et d'autres critères liés aux performances (puissance, consommation spécifique...),
- Soit aux performances égales, entre les taux d'émissions de chaque polluant.

**a. Moteur à allumage commandé :** Sur les moteurs à essence, la réduction du niveau d'oxydes d'azote en sortie de la chambre de combustion, peut se réaliser selon deux voies mises en œuvre séparément ou simultanément fonctionnant en mélange pauvre et riche :

- La combustion à très faible richesse. Il faut atteindre, dans certaines conditions, des valeurs de 0,6 - 0,7 pour obtenir un très faible niveau de NO<sub>x</sub>,
- Le recyclage externe d'une fraction des gaz d'échappement.

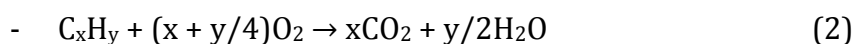
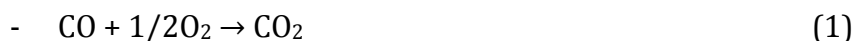
**b. Moteur Diesel :** En plus des différents moyens que le constructeur dispose, au stade de l'injection et de la combustion, ainsi que la géométrie de la chambre de combustion, pour agir plus précisément sur tel ou tel polluant, la technique EGR reste le moyen le plus simple et l'un des plus efficaces pour réduire les émissions de NOx. Les dispositifs utilisés dans le moteur Diesel, sont un peu plus complexes que ceux du moteur à essence.

### VIII.2.1.2. Traitement catalytique des gaz d'échappement

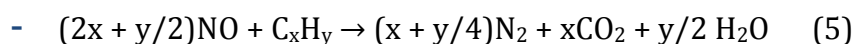
On a tout d'abord utilisé des catalyseurs d'oxydation sur des moteurs fonctionnant en mélange riche, puis des dispositifs de double catalyse, comportant successivement un catalyseur de réduction, une introduction d'air, puis un catalyseur d'oxydation. La catalyse dite « trois voies » a été introduite vers 1975 sur les moteurs à allumage commandé, fonctionnant à la stoechiométrie, elle s'est rapidement étendue. Depuis 1990, on assiste à un développement de la catalyse d'oxydation appliqué aux moteurs fonctionnant en mélange pauvre, à allumage commandé, Diesel ou deux temps. Le terme (trois voies), signifie que l'on traite simultanément CO, HC, et NOx par des réactions d'oxydoréduction. Les deux premiers polluants, étant oxydés, le troisième réduit.

Les réactions principales mises en jeu, sont les suivantes :

#### Oxydation



#### Réduction



Les deux réactions (1) et (2) se produisent à richesse inférieure ou égal à 1, tandis que les trois autres réactions, conduisant à la destruction de NO, sont favorisées en mélange riche. Réaliser dans les mêmes conditions, non seulement l'oxydation de CO et HC, mais aussi la réduction de NOx, implique que les cinq réactions, suscitées, se produisent

simultanément et de manière significative. Ceci n'est possible que si l'air et le carburant sont présents en quantité stoechiométrique. C'est pour cette raison que tout véhicule muni d'un pot catalytique trois voies, doit fonctionner à la stoechiométrie (Fig. VIII.5), la régulation de la richesse, s'effectue à l'aide d'une sonde Lambda

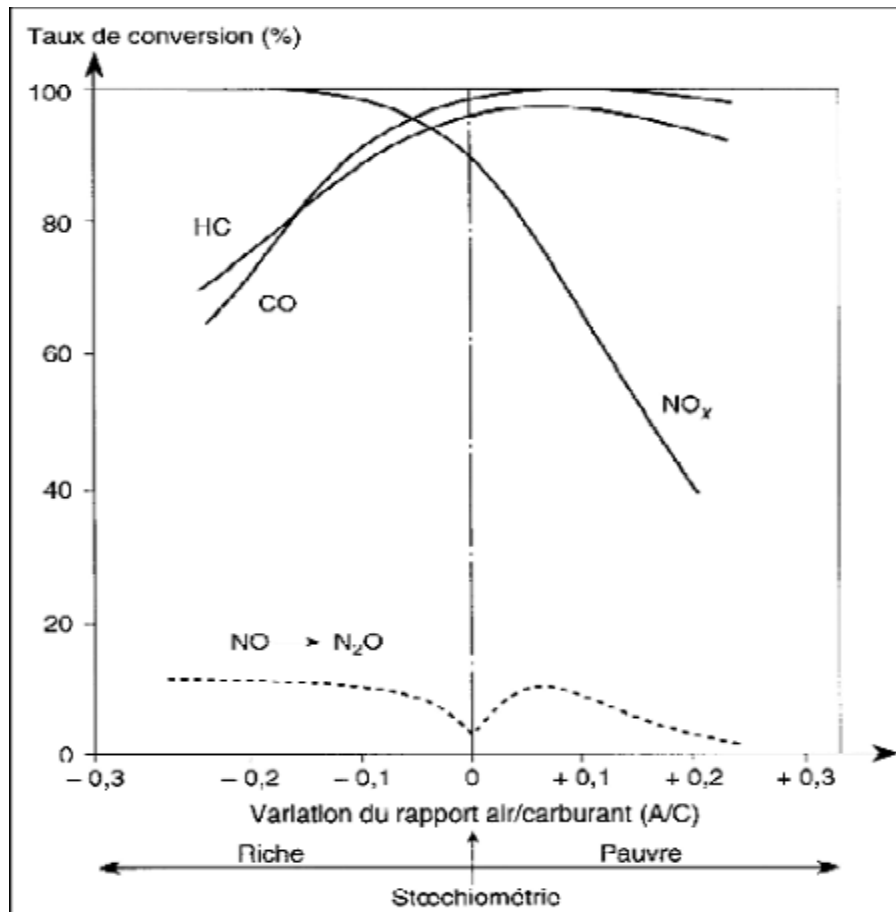


Fig. VIII.5 Variation du taux de conversion du pot catalytique en fonction de la richesse

Pour le moteur Diesel, il existe une technique dite la catalyse d'oxydation Diesel mais elle n'est pas aussi répandue que la catalyse trois voies des moteurs à essence, car sur les moteurs Diesel, les niveaux de réglementations en matière de CO et de HC ont été jusqu'à présent atteints, sans recourir aux dispositifs de post-traitement. Par ailleurs les catalyseurs d'oxydation n'ont qu'une efficacité limitée vis-à-vis des particules et ils ne modifient absolument pas les émissions des oxydes d'azote

### **VIII.3. Exercices**

#### **Exercice 1**

Quels sont les facteurs servant à déterminer les besoins d'une révision générale ?

#### **Solution 1**

- Chute de puissance
- Le moteur à des ratés
- Augmentation de la consommation du carburant
- Augmentation de la consommation d'huile
- Difficultés de démarrage
- Moteur anormalement bruyant
- Chute de pression de compression
- Gaz d'échappement de couleur plus sombre
- Réchauffement anormal du moteur
- .....

#### **Exercice 2**

A votre avis pourquoi la pression de compression est très basse sur un cylindre ?

#### **Solution 2**

- Mauvais jeu de soupape
- Segments de piston collés ou grippés

#### **Exercice 3**

A votre avis pourquoi le niveau d'huile est très basse ?

#### **Solution 3**

- Fuite d'huile au niveau du carter,
- Segments, chemise ou piston usés
- Joints du filtre d'huile usés

#### **Exercice 4**

Quels sont les indicateurs de pollution de l'air nuisibles pour la santé ?

**Solution 4**

Selon l'OMS, les particules provenant de la combustion de bois sont associées à une exacerbation de pathologies respiratoires, en particulier l'asthme et la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), de bronchite et d'otite moyenne.

**Exercice 5**

Quel type de pollution impacte chaque zone du corps humain ?

**Solution 5**

De plus, le monoxyde de carbone est responsable d'hypoxie tissulaire : une carence d'apport d'oxygène à la peau. Enfin, le dioxyde de soufre et les particules fines peuvent provoquer une irritation de la peau et des allergies cutanées.

## REFERENCES

- [1] NABIL KRIBES, *moteurs à combustion interne*, brochure de cours, Université du 8 Mai 1945 – GUELMA, 2015.
- [2] MOHAMED BENCHERIF, *Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Eléments de Carburation*, Polycopié destiné aux étudiants de Licence et Master LMD, Université de Mohamed Boudiaf, Oran, 2018.
- [3] HUSSEIN IBRAHIM, ADRIAN ILINCA, JEAN PERRON, *Moteur diesel suralimenté bases et calculs cycles réel, théorique et thermodynamique*, Rapport interne, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne, LREE-02 – Novembre 2006
- [4] KARL W. DSTINSON, M.E, Diesel, *Engineering handbook*, BUSINESS JOURNALS, 12<sup>TH</sup> edition. 1976.
- [5] M. MENARDON D. JOLIVET, *Les moteurs; moteur à explosion, moteur rotatif, moteur diesel*, Chotard et associés Editeurs, 1981.
- [6] GABRIEL TOURIGNY, *MOTEUR DIESEL; Fonctionnement, entretien et réparation*, Mc Graw-Hill, Editeurs, 1985
- [7] JEAN TRAPY, *Moteur à allumage commandé*, Technique de l'ingénieur, BM 2 540