

**Chapitre I :**  
**Généralités et revue**  
**bibliographique**

## **Chapitre I : Généralités et revue bibliographique**

### **I.1.Description**

Les moteurs à explosion est l'un des membres le plus importants de la grande famille des moteurs alternatifs à combustion interne, c'est-à-dire des moteurs qui produisent du travail par action directe sur un piston de la pression provenant de l'inflammation d'un mélange combustible, avec transformation du mouvement alternatif en rotation par l'intermédiaire d'un système bielle-manivelle. Le terme « allumage commandé » vient de ce que l'inflammation est initiée au moyen d'une étincelle, généralement d'origine électrique, en un moment bien déterminé du cycle.

L'alimentation avec des mélanges homogènes d'air et de vapeur de carburant est indispensable pour assurer un bon allumage, ce qui impose des carburants de bonne volatilité, telles les essences de pétrole, d'où son appellation, plus familière, de « moteur à essence ». Son omniprésence dans le domaine de la traction routière, et particulièrement dans celui de l'auto mobile, est à l'origine de sa grande popularité ; rares sont les propulseurs capables actuellement de le concurrencer dans cette utilisation.

### **I.2 .Les différents types de moteur**

Le plus ancien moteur est la machine à vapeur : dès le 1er siècle après J.C, Héron d'Alexandrie construit l'éolipyle, une chaudière hermétique remplie en partie d'eau, placée sur le feu. Deux tubes creux relient cette chaudière à une sphère pouvant tourner autour d'un axe horizontal. Deux tubes perpendiculaires à l'axe laissent sortir la vapeur de la sphère, ce qui, par propulsion, la fait tourner. [1]

En 1763, James Watt répare un moteur Newcomen (machine à balancier créée en 1712) et cherche un moyen d'augmenter son efficacité. Il crée une chambre de condensation pour la vapeur séparée par une valve. En 1781, il met au point le système mécanique permettant de créer un mouvement de rotation à partir du mouvement rectiligne du piston, ce qui lui permet ensuite de concevoir le cylindre à double action où la vapeur entraîne le piston lors de sa montée et de sa descente. La puissance de la machine en est fortement augmentée. [1]

En 1784, il dépose un brevet sur une locomotive à vapeur et invente un indicateur de pression de la vapeur dans le cylindre. Il construit en 1788 une valve de puissance pour rendre

la vitesse constante indépendamment des variations de la production de vapeur et des sollicitations de puissance de sortie et introduit une nouvelle unité de mesure de la puissance : le cheval vapeur. [1]

En 1803, Edmund Cartwright invente un nouveau type de condenseur enveloppant le cylindre ; avec l'apparition de chaudières produisant de la vapeur à haute pression, des machines compactes et puissantes vont ainsi pouvoir être fabriquées. La machine à vapeur est un moteur à combustion externe qui transforme de l'énergie thermique en énergie mécanique. La vapeur d'eau produite grâce à une chaudière est utilisée pour mouvoir un piston dans un cylindre, puis ce mouvement de translation est transformé en rotation par des bielles. Le terme externe vient du fait qu'aucune combustion n'a lieu dans le moteur et que le fluide caloporteur demeure confiné dans celui-ci. L'énergie thermique fournie par deux sources de température externes (une chaude et une froide) est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire de ce fluide qui subit un cycle thermodynamique fermé. Le chauffage de l'eau peut se faire sans combustion, par chauffage solaire, par exemple. Ces moteurs sont aussi appelés moteurs à air chaud, car à l'origine, le fluide de travail utilisé était l'air. Aujourd'hui, d'autres fluides étant utilisés, comme l'hydrogène, l'hélium ou l'azote, cette expression tend à disparaître.

Ces moteurs avaient une consommation inférieure aux autres pour une puissance supérieure, dans les années 1970, mais ils ne furent pas exploités industriellement. Les moteurs à combustion externe les plus connus sont le moteur Stirling (1816), le moteur Ericsson (1833) et, bien sûr, la machine à vapeur apparurent à la même époque que les premières machines à vapeur, les moteurs à combustion interne à pistons verront leur développement sommeiller pendant près de deux siècles, avant de s'affirmer comme les moteurs du XXe siècle. C'est le type de motorisation de véhicules le plus répandu de nos jours. [1]

Dans de tels moteurs, l'énergie thermique dégagée par la combustion et la détente d'un gaz est transformée en énergie motrice mécanique directement à l'intérieur du moteur. La combustion a lieu dans la même partie du moteur que la production de travail. On retrouve cependant les mêmes principes que lors d'un cycle de moteur à combustion interne : énergie chimique du fluide de combustion, combustion, chaleur, augmentation de la pression du fluide moteur, détente de ce fluide, travail mécanique.

L'explosion se produit dans un cylindre dont un des fonds est fixe, la culasse et l'autre mobile, le piston. Le déplacement rectiligne du piston est ensuite transformé en mouvement de rotation par un système bielle-manivelle, puis recueillie sur un arbre tournant appelé vilebrequin.

Il existe deux grands types de moteurs à combustion interne : les moteurs fournissant un couple sur un arbre et les moteurs à réaction. Dans le premier cas, un ensemble cylindre-piston permet le mouvement du véhicule, tandis qu'un moteur à réaction est destiné à propulser un véhicule en projetant un fluide (gaz ou liquide) vers l'arrière. Parmi les moteurs fournissant un couple sur un arbre, on distingue :

- ✚ les moteurs à allumage commandé, auxquels nous nous intéresserons particulièrement.
- ✚ les moteurs Diesel.
- ✚ les machines à pistons rotatifs à battement contrôlé (MPRBC), qui utilisent les rotations alternées d'un nombre pair de pistons.
- ✚ les turbines à gaz, qui consistent à faire tourner un arbre grâce à l'énergie cinétique issue de la détente dans une turbine de gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure.

Contrairement au moteur Diesel, le mélange combustible d'un moteur à allumage commandé ne s'enflamme pas spontanément lors d'une compression, mais nécessite l'action d'une étincelle provoquée par le système d'allumage. Une bougie provoque l'arc électrique enflammant les gaz dans la chambre de combustion, une bobine produit les hautes tensions nécessaires à la création de l'étincelle et il y a un système de commande de l'allumage (rupteur ou système électronique). Les principaux moteurs à allumage commandés sont :

- ✚ le moteur Wankel, dit « à piston rotatif », qui utilise un cycle quatre-temps avec un piston « triangulaire ».
- ✚ le moteur à deux temps.
- ✚ le moteur à quatre temps.

Les voitures électriques existent depuis 1881, mais ont rapidement été supplantées par les véhicules à essence, plus autonomes. Cependant, il est à noter que c'est une voiture électrique, là jamais contente de l'ingénieur belge Camille Jenatzy, qui dépasse pour la première fois les 100 km/h en atteignant 105,88 km/h le 1er mai 1899. Depuis une dizaine d'années, ses

véhicules sont l'objet de nombreuses recherches visant à augmenter l'autonomie de leurs batteries et à faciliter leur recharge, ce qui leur assurerait une utilisation potentielle par un plus large public. Ces automobiles sont mues par la force électromotrice de moteurs électriques, et alimentées soit par une batterie d'accumulateurs, soit par une pile à combustible (hydrogène ou méthanol), soit par un moteur thermique générateur (Wankel, Stirling, ou classique). Elles fonctionnent grâce à la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique par ces moteurs. [1]

Les voitures à moteur hybride associent plusieurs sources d'énergie, généralement un moteur thermique et un moteur électrique. Elles comportent deux moteurs distincts, contrairement aux véhicules électriques. Le premier modèle, la Toyota Prius, a été commercialisé en 1997 au Japon uniquement.

### **I.3 .Principe de fonctionnement de moteur Allumage Commandé**

Le moteur à allumage commandé (AC) est un moteur alternatif à combustion interne. Le travail est produit par la combustion d'un mélange carburé à l'intérieur d'un cylindre, dans lequel se déplace un piston en mouvement alternatif. Les deux limites extrêmes du mouvement sont appelées respectivement point mort haut (PMH) et point mort bas (PMB). Le volume balayé entre ces deux points constitue la cylindrée unitaire. Au PMH le volume résiduel est appelé volume mort ; il détermine ce que l'on nomme la chambre de combustion, qui est donc la portion de volume limitée par la culasse, le haut de chemise et la partie supérieure du piston. [2]

Du volume mort  $V_{cc}$  et de la cylindrée  $V_{cyl}$  se déduit le rapport volumétrique de compression :

$$Tx = \frac{V_{cyl} + V_{cc}}{V_{cc}} \quad \text{I.1}$$

Le mouvement alternatif du piston est transmis sous forme de rotation à l'arbre moteur, ou encore vilebrequin, par l'intermédiaire d'une bielle. La figure (FIG. 1.1) représente un moteur à allumage commandé en coupe avec ses principales dénominations.

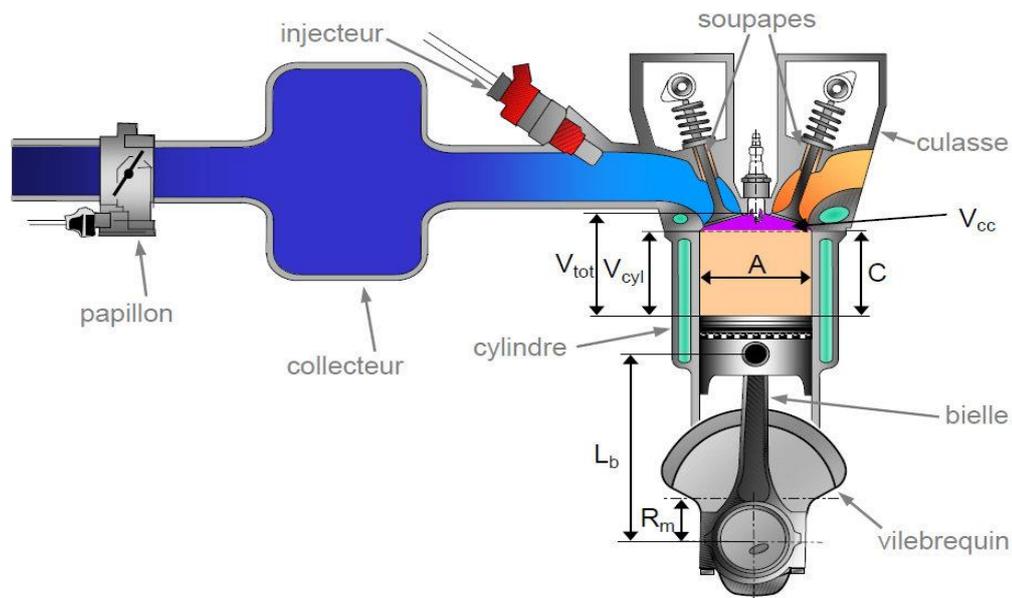


Figure I.1:Schéma d'un moteur Allumage Commandé. [3]

## I.4 Éléments de construction

### I.4.1 Cylindre, piston et culasse

Le cylindre peut être alésé directement dans le bloc moteur ou bien être constitué d'une chemise rapportée (généralement en fonte). Les pistons sont en alliages légers et l'étanchéité avec le cylindre est assurée par des segments en fonte ou en acier. La culasse est généralement réalisée avec des alliages légers ; elle assume le triple rôle de fermeture du haut de cylindre, de support du système de distribution, et de refroidissement de la chambre de combustion. C'est elle qui porte habituellement en empreinte la chambre de combustion, dont les géométries peuvent présenter une grande diversité (figure I.2). Parfois la chambre est contenue en tout ou en partie dans le piston (chambre partagée telle la chambre « Héron » par exemple ou Toyota à injection directe). [2]

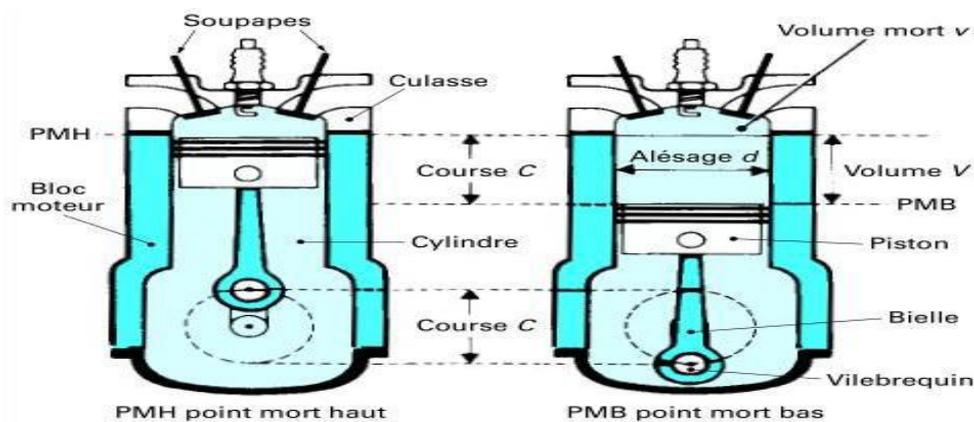


Figure I.2 : Ensemble cylindre-piston- culasse. [2]

**Tableau I.1** : les différentes opérations et équipements d'un moteur.

Opérations	Rôle assuré par
préparation du mélange air-essence transformation en mélange gazeux	Le carburateur
admission dans le cylindre	soupape d'admission
compression du gaz	le piston
L'injection	la pompe à injection
inflammation, allumage	étincelle électrique
transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire	l'ensemble piston-bielle-arbre moteur
évacuation des gaz brûlés	la soupape d'échappement
ouvertures et fermetures des soupapes	périodiques les organes de distribution
graissage et refroidissement circuit de circulation d'huile,	d'eau ou d'air

#### I.4.2 Distribution et alimentation

Le système de distribution assure le remplissage du cylindre et l'évacuation des gaz de combustion. Il comporte des soupapes, commandées par un ou plusieurs arbres à cames, et des mécanismes intermédiaires constitués de poussoirs et de culbuteurs. Le nombre de soupapes par cylindre est au minimum de 2 (admission et échappement) ; il peut être augmenté de manière à accroître les capacités de remplissage du moteur et donc ses performances. L'arbre à cames tourne à mi-vitesse par rapport au vilebrequin (moteurs 4 temps) ; il peut être situé au niveau du bloc moteur, ou encore au niveau de la culasse (arbre à cames « en tête »). Certains moteurs ont deux arbres à cames qui actionnent séparément soupapes d'admission et d'échappement, notamment lorsque les tubulures sont placées de part et d'autre de la culasse (système crossflow). [2]

Le système d'alimentation doit réaliser le dosage des débits d'air et de carburant pour que le mélange soit combustible et amener l'ensemble jusqu'au cylindre. Les principaux procédés d'alimentation sont la carburation, autrefois majoritairement utilisée, qui a été largement supplantée par l'injection. L'injection de carburant dans le collecteur d'admission (ou injection indirecte) est devenue prédominante en liaison avec l'introduction massive des systèmes de dépollution par catalyse (§ 5.2). L'injection directe d'essence sous haute pression dans le cylindre, connue depuis longtemps mais peu pratiquée en automobile, voit actuellement un regain d'intérêt du fait des substantielles améliorations de rendement qu'elle permet et en dépit des complications qu'elle impose aux systèmes de dépollution. [2]

### I.4.3 Allumage

L'allumage du mélange carburé est provoqué par une étincelle électrique éclatant entre les électrodes d'une bougie (figure I.3). Un circuit spécial assure la mise en tension, la distribution entre les cylindres et la détermination de l'instant d'allumage. Encore récemment, le circuit d'allumage se composait d'une bobine d'induction, d'un rupteur (les vis platinées), et d'un distributeur. [2]

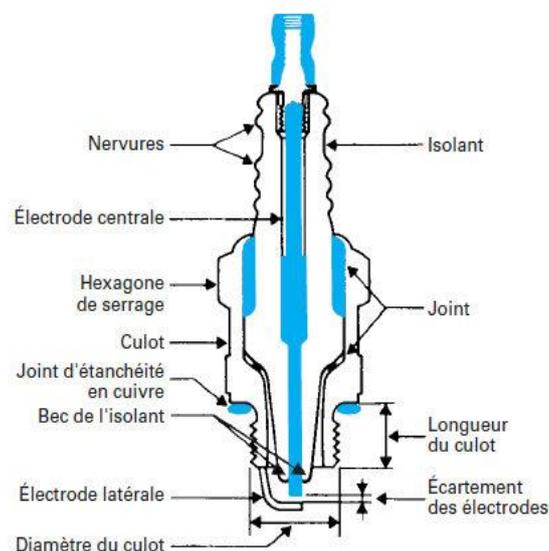


Figure I.3. : Bougie d'allumage [2].

### I.4.4 Lubrification et refroidissement

Le moteur AC n'est pas particulièrement exigeant pour sa lubrification, sauf lorsqu'il s'agit d'utilisations spéciales (compétition, endurance...). Le circuit de graissage classique comporte une pompe (généralement à engrenages), un filtre et un réseau de canalisations qui amènent l'huile aux endroits nécessaires, les paliers d'arbres en particulier. Les cylindres sont

lubrifiés par projection et, dans les moteurs performants, il se trouve des ajutages pour projeter l'huile sur les fonds de pistons et ainsi les refroidir. Des échangeurs huile-eau peuvent être aussi installés pour limiter la température du lubrifiant. Lorsqu'il y a un turbocompresseur, il est lubrifié par le circuit principal, de même pour les poussoirs hydrauliques dont les moteurs modernes sont équipés et qui servent à rattraper automatiquement les jeux soupapes-culbuteurs. Les moteurs 2 temps de faible puissance et à admission par le carter sont lubrifiés par de l'huile mélangée au carburant (2 à 3 % en volume). [2]

La plupart des moteurs AC sont refroidis par circulation d'un liquide, généralement un mélange d'eau et d'éthylèneglycol à 50 %. Les parties du moteur exigeant un refroidissement sont celles concernées directement par la combustion, c'est-à-dire la culasse (chambres de combustion) et les cylindres dans le bloc moteur. La circulation du liquide est assurée par une pompe entraînée directement par l'arbre moteur ; la température est limitée au moyen d'un échangeur liquide-air (le radiateur). Celui-ci peut être soufflé par un groupe moto-ventilateur, dès que la vitesse du véhicule est insuffisante pour assurer naturellement les échanges. Dans les moteurs d'automobiles, le circuit de refroidissement peut contribuer au chauffage de l'habitacle au moyen d'un échangeur spécifique monté en parallèle : l'aérotherme.

## I.5. Etude thermodynamique

### I-5-1. Le moteur à quatre temps (cycle de Beau de Rochas)

Ce cycle a été défini par Beau de Rochas en 1862 puis mis en œuvre par Étienne Lenoir en 1883. Il est composé de quatre étapes au cours desquelles le piston effectue quatre mouvements linéaires :

-  admission du mélange
-  compression
-  combustion/détente
-  échappement.

Le cycle commence à un point mort haut, où le piston est à son point le plus élevé. Pendant l'admission, le piston descend et permet au mélange d'air et de carburant d'être aspiré dans le cylindre via la soupape d'admission. Lors de la compression, la soupape d'admission se ferme, le piston remonte comprimant ainsi le mélange admis.

Au moment de la combustion, le mélange air-carburant est enflammé par une bougie d'allumage, aux environs du deuxième point mort haut (remontée complète du piston).

La pression des gaz portés à haute température force le piston à descendre, provoquant une détente des gaz. Ce mouvement est le seul temps moteur du cycle (produisant de l'énergie directement utilisable).

A l'échappement, les gaz brûlés sont évacués du cylindre via la soupape d'échappement poussée par la remontée du piston.

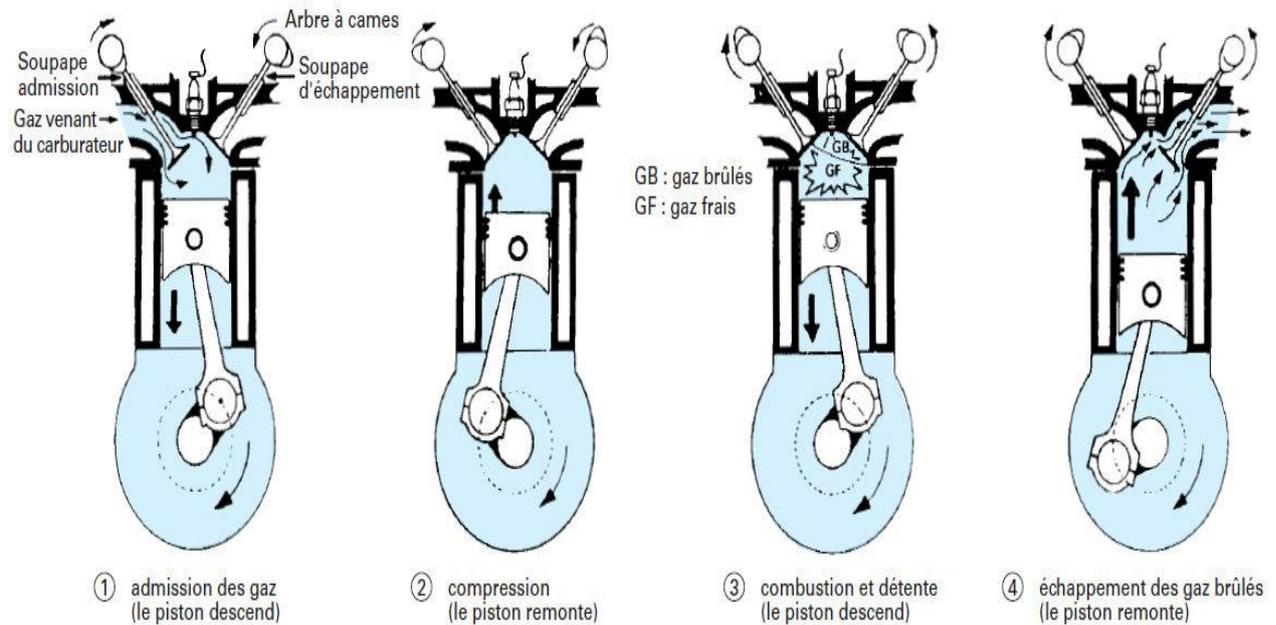


Figure I. 4 : Cycle à 4 temps. [5]

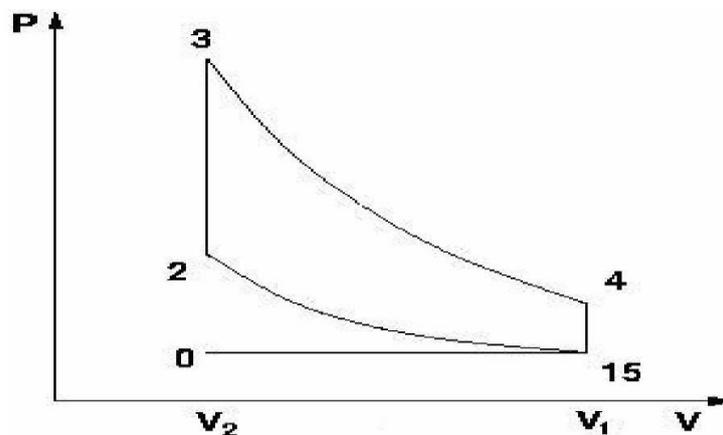


Figure I.5 : Diagramme de cycle de Beau de Rochas.

On modélise le cycle par des transformations particulières :

✚ 0-1 Admission: aspiration d'air+essence ( $p=\text{coste}$ )

✚ 1-2 Compressions adiabatiques réversibles ( $Q=0$  pas d'échange de chaleur).

$$W_c = \Delta u_{12} = C_v (T_2 - T_1) \quad (\text{I.1})$$

$$T_2 = E^{\gamma-1} T_1 \text{ et } P_2 = E^{\gamma-1} P_1 \quad (\text{I.2})$$

Données : le rapport volumétrique de compression  $E = V_1 / V_2 = V_{\text{PMB}} / V_{\text{PMH}}$

le rapport des pressions dans la combustion :  $\lambda = P_3 / P_2 = T_3 / T_2$

$W_c$  Est le travaille de compression.

✚ 2-3 Combustions à volume constant (transformation isochore).

✚ 2-3 Combustions à volume constant (transformation isochore).

$$Q_{\text{comb}} = \Delta u_{23} = C_v (T_3 - T_2) \quad (\text{I.3})$$

$$T_3 = E^{\gamma-1} \lambda T_1 \text{ et } P_3 = E \lambda P_1 \quad (\text{I.4})$$

✚ 3-4 Détentes adiabatiques réversibles.

$$W_D = \Delta u_{34} = C_v (T_4 - T_3) \quad (\text{I.5})$$

$$T_4 = \lambda T_1 \text{ et } P_4 = \lambda P_1 \quad (\text{I.6})$$

✚ 4-5 Détente à l'ouverture de la soupape d'échappement

✚ 5-0 Échappement : évacuation des gaz

Le rendement thermique ne dépend que du taux volumétrique de compression  $E$ . Plus ce rapport est grand, plus le rendement thermique est élevé.

### I-5-2.Cycle deux-temps

Le cycle d'un moteur deux temps est constitué de deux mouvements linéaires du piston au lieu de quatre lors d'un cycle de Beau de Rochas, bien que les quatre mêmes opérations (admission, compression, combustion/détente et échappement) soient toujours effectuées. Ainsi, on a un cycle moteur par tour au lieu d'un tous les deux tours. Les deux étapes sont les suivantes :

✚ admission/compression.

✚ combustion-détente/échappement (balayage des gaz).

Lors de la détente, le piston (5) est au point mort haut. La bougie initie la combustion et le piston descend en comprimant en même temps le mélange présent dans le carter, sous le piston.

C'est la partie motrice du cycle, le reste du parcours sera dû à l'inertie créée par cette détente. Lors de cette descente du piston, l'entrée (6) du mélange dans le carter se ferme.

A l'échappement, le piston arrivé au point mort bas débouche les lumières d'échappement (2) et d'arrivée de mélange dans le cylindre (3) : le mélange pénètre dans le cylindre et chasse les gaz de la combustion (zone 1). Il s'agit de l'étape d'admission - échappement.

Au moment de la compression, le piston remonte et comprime le mélange dans le cylindre. Il rebouche l'échappement (2) et l'entrée de mélange dans le cylindre (3), tout en, créant une dépression dans le carter (4) qui va permettre l'admission du mélange air-essence, par la lumière d'arrivée (6) dont l'entrée a été libérée par la position du piston proche du point mort haut. Une fois arrivé à nouveau au point mort haut, le cycle peut recommencer à partir du premier point.

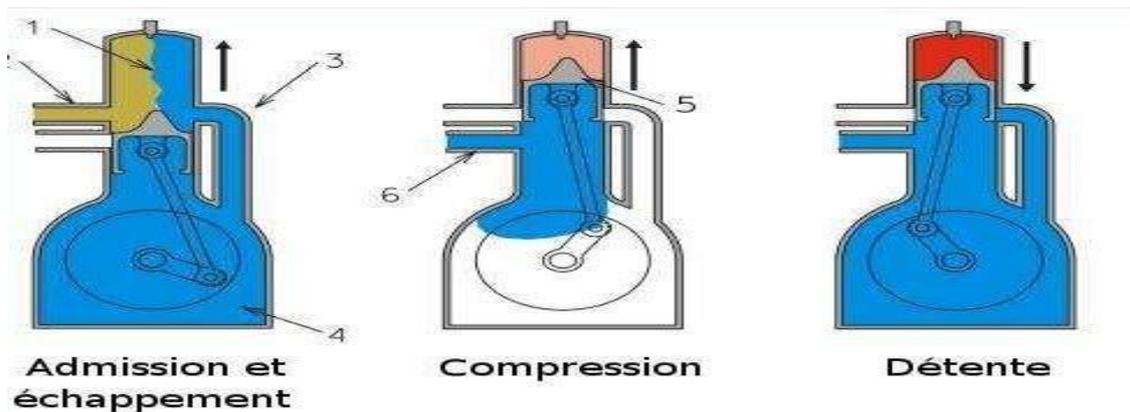


Figure I.6 : cycle 2 temps. [2]

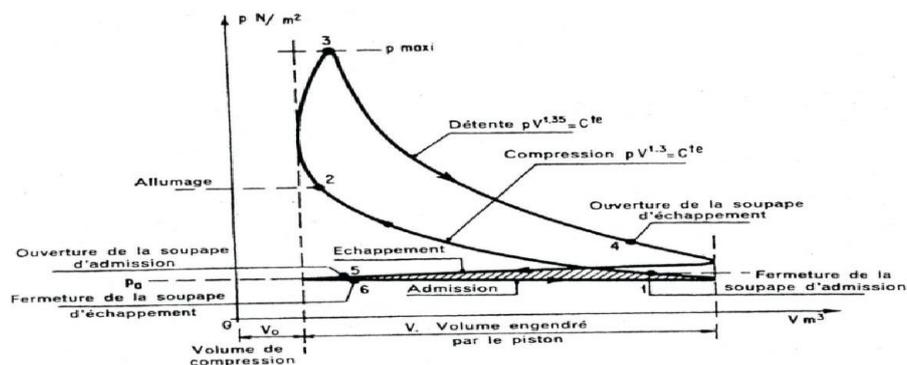


Figure I.7 : Allure du cycle du gaz dans le plan (P, V) (moteur à allumage commandé AC).

[4]

## Les grandeurs caractéristiques

- ✚ Le taux de remplissage  $\varepsilon_R$  : la masse admise par  $m_{cycle} = \rho \varepsilon_R (V_1 - V_2)$
- ✚ le travail indiqué par cycle :  $W_i = \int PdV = (\text{Aire cycle réel})$
- ✚ le rendement thermique :  $\eta_{th} = W_i / Q_{comb}$
- ✚ le rendement effectif :  $\eta_{eff} = \eta_{th} + \eta_m$
- ✚ Le rendement effectif d'un moteur essence est voisin de 25%.
- ✚ Le rendement effectif d'un moteur Diesel est voisin de 35%
- ✚ le nombre de cycles par seconde X :  $X = 2Nn / (60 \times 2 \text{ temps})$
- ✚ La puissance effective  $P_{eff} = W_{eff} X$  et la puissance indiquée  $P_i = W_i X$
- ✚ Le couple moteur  $C_m = P_{eff} / W$  (couple moteur Diésel > couple moteur essence)
- ✚ l'énergie mécanique (travail) par litre de cylindrée :  $P_{me} = W_{eff} / V_e$
- ✚ La consommation spécifique effective :  $C_{se} = \frac{m_{comb} * 3600}{P_{eff}}$

### I-5-3.Comparaison deux temps-quatre temps

Le principal inconvénient du moteur deux temps est la distance courte entre la charge fraîche et les gaz brûlés, qui induit une perte d'hydrocarbures imbrûlés. L'injection directe, qui consiste à balayer le cylindre avec de l'air pur et à n'injecter le carburant qu'à la fin, permet de résoudre ce problème. De plus, l'huile nécessaire à la lubrification du cylindre se mélange avec le carburant, et est donc émise dans l'atmosphère, ce qui n'est (presque) pas le cas pour le 4 temps. Ayant deux fois plus de combustions à régime égal qu'un 4 temps, le cylindre à tendance chauffer, ce qui entraîne des perlages de bougie (qui n'existe plus avec les huiles et les bougies actuelles), qui peuvent être évités grâce à un système de refroidissement efficace (liquide) et en utilisant des bougies de bonne qualité. [2]

Avec un carburateur ou une injection indirecte, le mélange du carburant avec l'air a lieu avant l'admission. Un cycle à quatre temps a alors un meilleur rendement que le cycle à deux temps mais à cylindrée égale est moins performant. En outre, un moteur à 4 temps nécessite une distribution complexe (soupapes, arbres à cames...), et parmi ces 4 temps, un seul est moteur (la détente) ; le piston fournit de l'énergie mécanique une fois tous les 2 tours et donc il se produit des irrégularités au niveau du couple du moteur. Enfin, les moteurs 4 temps sont longs et coûteux à réparer à cause du nombre de pièces nécessaires à leur fonctionnement. [2]

## I.6. Préparation du mélange et injection (moteur à essence)

Le mélange est préparé avant l'entrée dans les cylindres. Certaines conditions sont à respecter:

- ✚ le carburant doit être vaporisé.
- ✚ la richesse du mélange doit être convenable à tous les régimes.
- ✚ le mélange doit être homogène.

Il existe 2 méthodes :

- ✚ la carburation
- ✚ l'injection (directe ou indirecte)

### I.6.1. Carburation

La carburation consiste à aspirer et pulvériser le carburant dans l'admission en utilisant la vitesse de l'écoulement d'air admis. Elle est réalisée par un carburateur qui, très schématiquement, comporte un orifice calibré (le gicleur) pour doser le carburant, un étranglement (la buse) afin de créer localement sur le circuit d'admission une dépression capable d'aspirer le carburant, enfin en aval un volet pour régler la quantité de mélange admis. En plus du circuit principal ainsi décrit, il existe de nombreux circuits et dispositifs auxiliaires afin de prendre en compte tous les fonctionnements particuliers : circuit de ralenti, volet de départ, pompe de reprise, enrichisseur de pleine charge, etc.. Les carburateurs évolués sont multicorps pour optimiser leur fonctionnement sur une plage étendue de charge et de régime et leur contrôle fait appel aux ressources de l'électronique (papillon motorisé, vannes électromagnétiques, etc.).

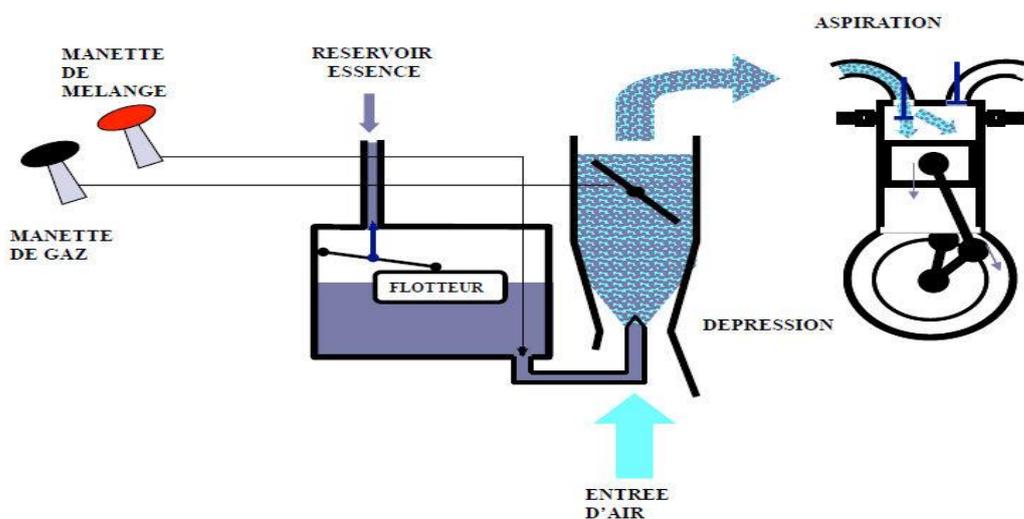
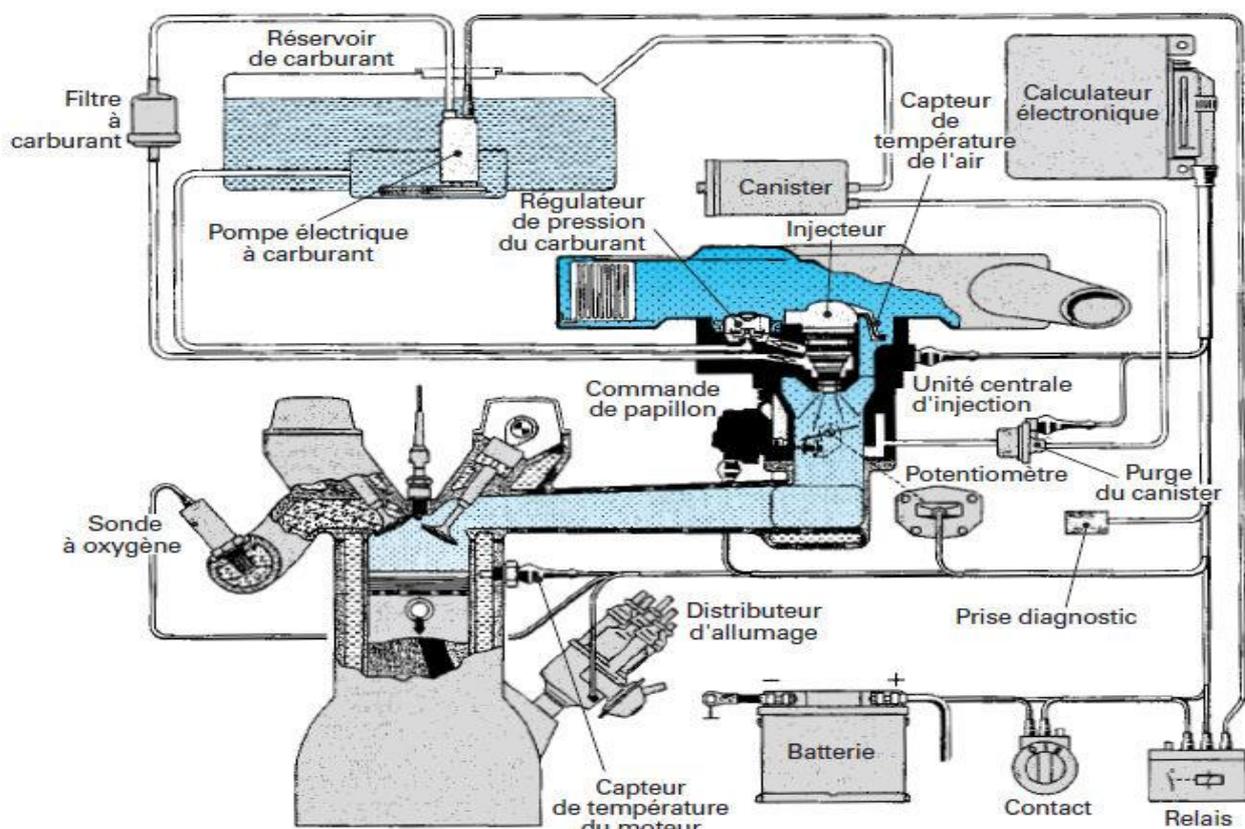


Figure I.8 : schéma technique d'un carburateur.

## I.6.2. Injection

### I.6.2.1.L'injection indirect

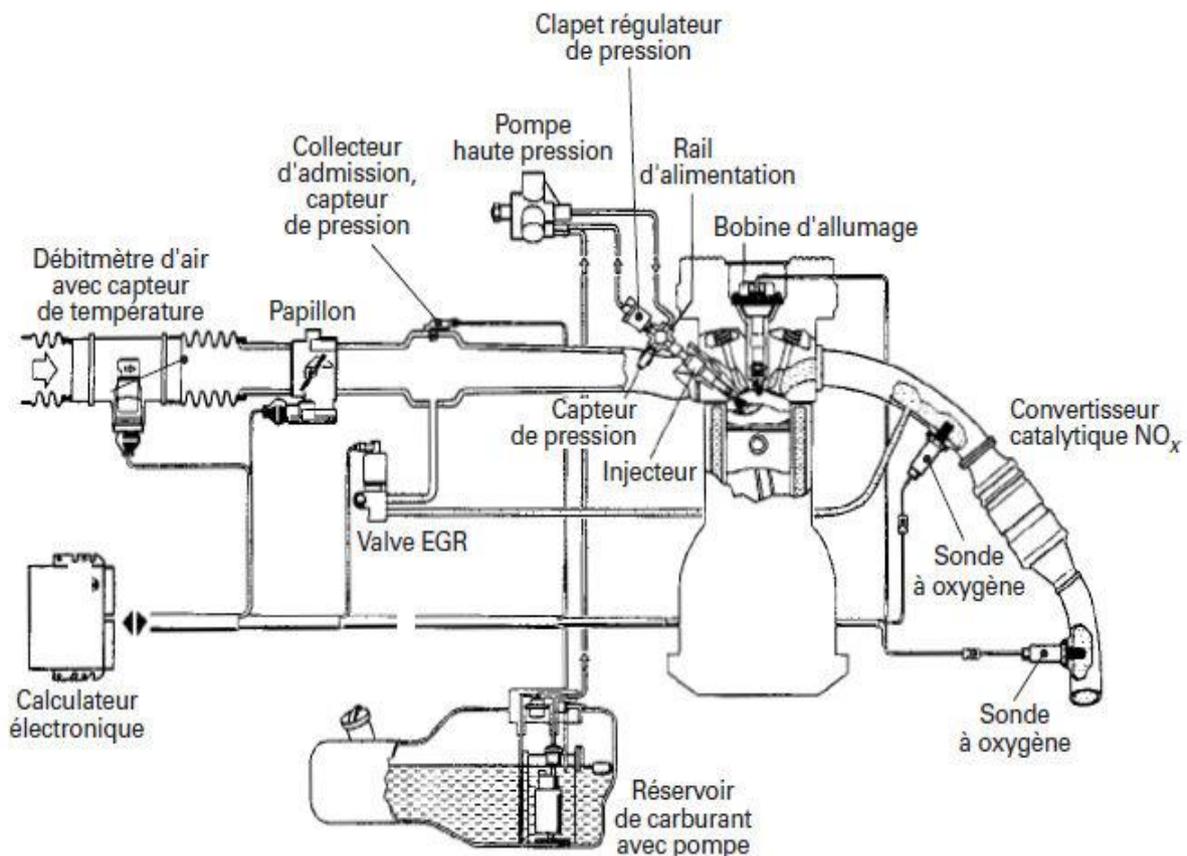
L'alimentation par injection indirecte est réalisée en introduisant le carburant en jet liquide sous pression dans la tubulure d'admission. L'injection peut être monopoint si elle se produit très en amont des cylindres (figure I.9) ou multipoint lorsqu'il existe un injecteur par cylindre, placé très près de la chapelle d'admission. Le procédé le plus usité actuellement est l'injection dite « électronique », pour laquelle des injecteurs à soupape électromagnétique sont soumis à une pression de carburant constante, leur ouverture étant commandée par des impulsions électriques (Bosch Mono-Jetronic et L - Jetronic par exemple). Dans tous les cas, le système comporte une pompe électrique de mise en pression, un dispositif pour évaluer le débit d'air (plateau mobile, fil chaud, courbes programmées...), et un calculateur électronique gérant les informations issues des différents capteurs (température d'admission, pression...) et pilotant l'injection. Les fonctionnements particuliers Dans les 2 cas, le système comporte une pompe électrique de mise en pression, un dispositif pour évaluer le débit d'air et un calculateur électronique gérant les informations issues des différents capteurs (température d'admission, pression, etc.) et pilotant l'injection. [2]



**Figure I.9** : Circuit d'injection monopoint (Bosch Mono-Jetronic). [2]

### I.6.2.2.L'injection direct

L'injection directe a pour principe d'envoyer le carburant sous pression directement dans le cylindre (figure I.10). Dans le cas des fonctionnements avec excès d'air (charges partielles), le carburant est injecté pendant la phase de compression. Le jet de carburant doit ainsi se vaporiser et se mélanger à l'air dans un délai très court ; la richesse du mélange n'est donc pas homogène dans la chambre de combustion. Tout l'art du motoriste est de gérer cette hétérogénéité et de pouvoir en contrôler à la fois la composition et la localisation. Dans le cas des fonctionnements en mélange homogène (pleine charge), le carburant est injecté pendant la phase d'admission et dispose du temps nécessaire pour se vaporiser et bien se mélanger à l'air. Le gain de rendement provient du fonctionnement en mélange globalement pauvre et de l'accroissement du taux de compression qu'autorise l'abaissement des températures dans le cylindre provoqué par la vaporisation du carburant. Il y a, de plus, une réduction des pertes par pompage car l'admission d'air s'effectue en permanence à pleine ouverture. Des améliorations de 10 % du rendement sont ainsi observées sur des moteurs en production.



**Figure I.10** : Circuit d'injection directe (Bosch MED-Motronic). [2]

## **I.7.Paramètres et réglages des moteurs AC**

La cylindrée a une influence directe sur la quantité de travail fourni par le moteur, le couple et la puissance lui sont proportionnels. Le rendement thermodynamique s'améliore lorsque la cylindrée augmente, car les transferts thermiques deviennent proportionnellement plus faibles.

Le rapport volumétrique de compression est déterminant pour le rendement, mais les effets de son accroissement sont très atténués au-dessus de la valeur 10. De plus, dès que ce rapport dépasse 12, les augmentations des niveaux de pression et de température entraînent de sérieuses limitations dues au cliquetis (combustion détonante).

Le rapport course-alésage doit être minimisé, si l'on désire augmenter le régime maximal du moteur en limitant la vitesse du piston. La tendance est de rendre inférieur à 1 (moteurs carrés (alésage = course) et super carrés (alésage > course), afin de disposer d'une surface d'alésage suffisante pour accroître les dimensions des soupapes.

Le nombre de soupapes est facteur influant sur la puissance spécifique par modification de l'aptitude au remplissage du moteur. Dans le domaine automobile, la multiplication des soupapes est un procédé en vogue, car sans atteindre les gains possibles avec un compresseur, il permet une grande souplesse de fonctionnement sur toute la plage d'utilisation du moteur.

La géométrie de la chambre de combustion est importante pour la combustion et peut jouer en particulier sur la sensibilité au cliquetis (aérodynamique interne).

Le calage de la combustion dans le cycle s'opère en modifiant l'avance à l'allumage. Le constructeur cherche à établir des courbes d'avance optimisées pour tous les points de fonctionnement, sous contraintes d'apparition du cliquetis et d'exigences de l'antipollution.

Le contrôle des émissions de polluants essentiellement les oxydes d'azote et les imbrûlés impose des dispositifs (recirculation des gaz d'échappement, mélanges pauvres) entraînant des retards d'avance par rapport à l'optimum.

Le réglage de la richesse du mélange carburé (la carburation) est un moyen de contrôler le rendement et les émissions polluantes du moteur.

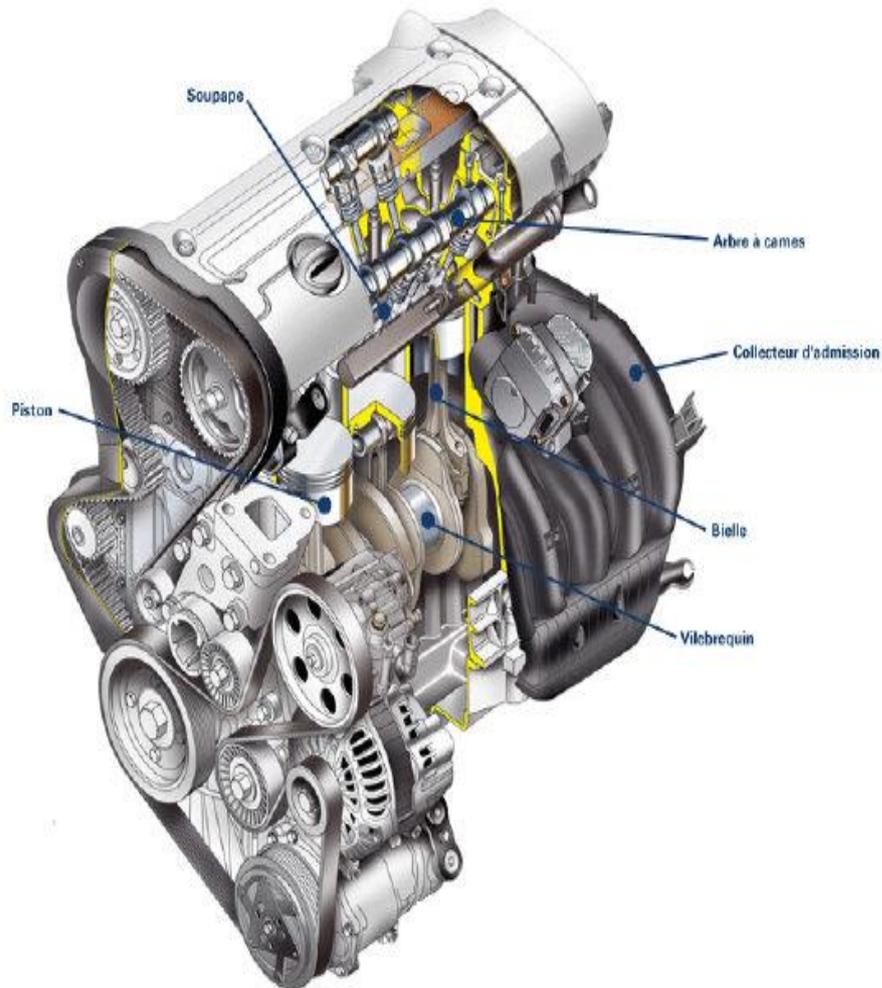


Figure I.11. : Les différents organes d'un moteur.

## I.8. Chimie de la combustion

Le terme de combustion désigne une réaction chimique à évolution rapide accompagnée d'émission lumineuse et d'un important dégagement de chaleur : la flamme.

### I-8.1. Classification des différentes variétés de combustion

Les processus d'inflammation, c'est-à-dire d'initiation de la combustion, doivent être séparés du processus de propagation de la flamme :

Le processus d'inflammation nécessite un apport d'énergie extérieure au processus :

Chauffage des parois du réacteur contenant le mélange, compression adiabatique du mélange par une onde de choc ou un rétrécissement du volume, création d'un plasma entre deux électrodes. Le processus de propagation de la flamme s'effectue sans intervention

externe sur le système. Les couches successives du mélange combustible s'enflamment en utilisant l'énergie dégagée par la combustion des couches précédentes. [1]

### **I-8-2. Différentes formes de combustion**

- ✚ Homogène : comburant et carburant sont pré mélangés dans un rapport donné. Exemples :  
Moteur à allumage commandé, chalumeau.
- ✚ Hétérogène : la combustion a lieu à la frontière entre comburant et carburant. Comburant et carburant peuvent être tous les deux ou l'un ou l'autre : solides, liquides ou gazeux.
- ✚ Stratifiée : comburant et carburant sont pré-mélangés dans un rapport variable compris entre une valeur permettant l'inflammation et le rapport caractérisant la présence de comburant.

par. Exemple : moteur à charge stratifiée.

### **I-8-3. Combustion en milieu homogène**

- ✚ Combustion lente : Dans une oxydation à vitesse limitée partant du point d'allumage, la quantité de chaleur apportée par la combustion est égale à la quantité de chaleur transférée hors du réacteur. Exemple : mélange à basse température et/ou à excès d'air important.
- ✚ Déflagration : La quantité de chaleur dégagée par la combustion dans le réacteur est supérieure à la quantité de chaleur transférée à l'extérieur du système en réaction (la température du mélange frais ou la concentration en carburant est suffisamment élevée), la combustion s'entretient d'elle-même, la flamme est en mesure de quitter la zone d'allumage sans extinction. Le processus de diffusion de la chaleur entre la flamme et le mélange frais peut être lié à un processus de diffusion moléculaire : flamme laminaire ou de diffusion turbulent (c'est-à-dire par masse et volume finis) : flamme turbulente

## **I.9. Normes de pollution et solutions apportées**

### **I.9.1. Les normes européennes de pollutions**

Les moteurs sont soumis à des normes d'émission Euro qui fixent les limites maximales de rejets polluants pour les véhicules roulants. Il s'agit d'un ensemble de normes de plus en plus strictes s'appliquant aux véhicules neufs. L'objectif est de réduire la pollution atmosphérique due au transport routier. Les émissions de CO<sub>2</sub> (résultant naturellement de la combustion de matières carbonées) ne sont pas prises en compte dans cette norme car il ne

s'agit pas d'un gaz polluant direct (respirer du CO<sub>2</sub> n'est pas toxique pour l'homme et les animaux). La surveillance des émissions de CO<sub>2</sub> par les véhicules fait l'objet d'autres travaux de la part de l'Union européenne. [1]

La législation européenne est de plus en plus sévère sur les rejets des moteurs Diesel. Les normes d'émissions « Euro » se succèdent. La mise en œuvre se fait dans des délais légèrement décalés pour les moteurs Diesel et essence (Figure I.12) :

- ✚ Euro 0 : véhicules mis en service après 1988 ;
- ✚ Euro 1 : véhicules mis en service après 1993 ;
- ✚ Euro 2 : véhicules mis en service après 1996 ;
- ✚ Euro 3 : véhicules mis en service après 2000 ;
- ✚ Euro 4 : véhicules mis en service après 2005 ;
- ✚ Euro 5 : après septembre 2009 pour la réception et janvier 2011 pour l'immatriculation de véhicules neufs ;
- ✚ Euro 6 : après septembre 2014 pour la réception et septembre 2015 pour l'immatriculation de véhicules neufs.

Les trois générations de normes européennes pour les véhicules légers Euro1 (1992), Euro2 (1996) et Euro3 (2000) ont eu un impact sensible sur les émissions des véhicules commercialisés dans l'Union et ont ainsi contribué à une forte réduction des pollutions locales. La norme Euro1, qui correspond à l'arrivée des pots catalytiques pour les voitures à essence, a marqué le début d'une tendance constante vers l'amélioration des performances. La norme Euro4 « Automobile » est entrée en vigueur le 1er janvier 2005. Tous les véhicules produits après cette date émettent globalement 2 fois moins de polluants que les véhicules soumis à la norme Euro 3.

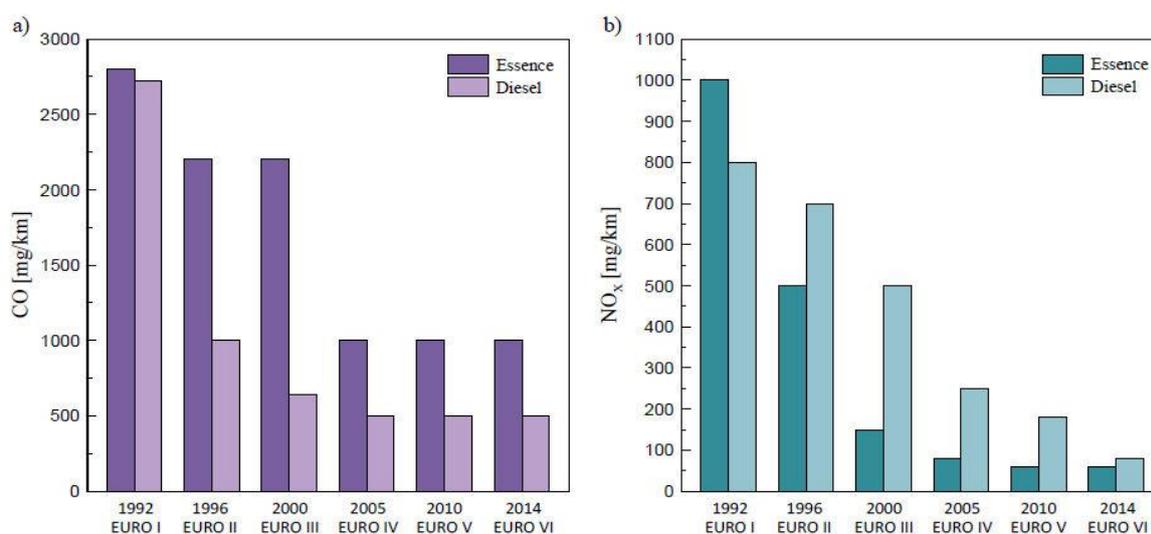
Les émissions de polluants sont mesurées durant un cycle de conduite normalisé appelé NEDC (New European Driving Cycle) qui dure 20 minutes. Il comprend une première phase de conduite typée "ville" suivi d'une phase de conduite plus rapide typée "route". La vitesse moyenne durant ce cycle est de 33 km/h.

Si ces normes doivent être encore abaissées pour continuer à limiter les émissions des véhicules neufs, on estime que les véhicules les plus anciens (20% du parc automobile) sont encore responsables de 60% des émissions polluantes. Le renouvellement du parc s'effectuant sur un temps de rotation de 25 à 30 ans pour les voitures et de 7 à 12 ans pour les 2 roues, il

faut toujours un temps de latence avant qu'on puisse observer les effets des normes sur l'environnement.

Ces normes créent une vive polémique puisqu'elles évoluent régulièrement et forcent les constructeurs de moteurs à modifier les technologies employées ; aussi, contestent-ils les valeurs limites ou demandent-ils des délais complémentaires pour leur mise en œuvre.

Comme la norme s'applique uniquement aux véhicules vendus neufs, certains revendeurs n'hésitent pas à faire immatriculer des voitures neuves avant la date butoir pour les revendre en occasion avec 0 km. D'un autre côté, les véhicules de plus de 2 500 kg (grosses berlines principalement), qui sont logiquement animés par un gros moteur et polluent donc en proportion, obtiennent régulièrement des délais supplémentaires avant de se mettre aux normes.



**Figure I.12. :** Evolution de la norme Euro sur les émissions polluantes CO (a) et NOx (b) des véhicules essence et diesel depuis 1992 (source Journal Officiel de l'Union Européenne).

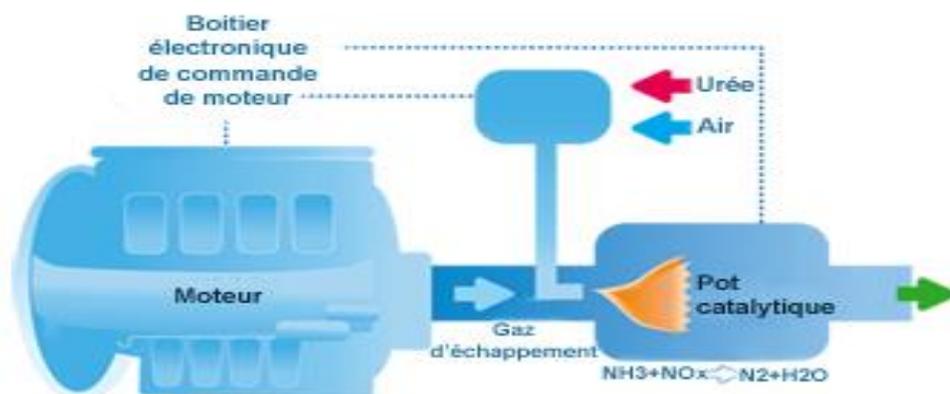
### I.9.2. Les nouvelles moyennes anti-pollution

Dans l'objectif de diminuer la consommation de carburant, la solution est d'en injecter moins en proportion par rapport à l'oxygène. Mais ceci entraîne une élévation de la température pendant la combustion et donc une production d'azote.

C'est sur ce dernier point que les constructeurs concentrent principalement leurs recherches pour diminuer la pollution.

### I-9-2-1.L'AdBlue

Les normes de la classe 5 ont été anticipées, du moins pour les émissions de NO<sub>x</sub>, avec l'apparition de l'AdBlue. L'AdBlue est aujourd'hui utilisé par tous les véhicules poids lourds récents. AdBlue est la marque commerciale sous laquelle est diffusée la solution AUS32 – Solution Aqueuse d'Urée à 32,5% - utilisée dans le processus de réduction catalytique sélective (SCR). Elle permet de convertir 85% des oxydes d'azote contenus dans les gaz d'échappement, en azote et en vapeur d'eau.



**Figure I.13 :** Fonctionnement-de L'AdBlue.

La réaction est :  $\text{NH}_2 + \text{NO}_x \Rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$

La consommation de ce produit est de 1L pour 10 litres de gazole, le prix est sensiblement identique à celui du gazole.

### I-9-2-2.EGR

Une injection haute pression diminue les particules formées lors de la combustion, tandis que l'EGR (Exhaust gas recirculation) fait baisser le taux d'oxydes d'azote en refroidissant une partie des gaz d'échappement qui est réintroduite dans le moteur avec l'air d'admission.

### I-9-2-3. Pot catalytique

L'inconvénient majeur du pot catalytique réside dans le fait que, comme sur un moteur à allumage commandé (moteur à essence), son efficacité n'intervient qu'après une plus ou moins longue période de chauffe (suivant la température ambiante extérieure). Ce phénomène pose le problème de l'adaptation des motorisations thermiques à la circulation urbaine qui se caractérise par des trajets plutôt courts, souvent insuffisants pour permettre au dispositif catalytique d'atteindre la température nécessaire à son efficacité. Certains pots catalytiques sont d'ailleurs équipés de systèmes favorisant leur montée en température.