



MOTEURS A COMBUSTION INTERNE

Pierre Duysinx
Université de Liège
Année académique 2009-2010



Références bibliographiques

- R. Bosch. « Automotive Handbook ». 5th edition. 2002. Society of Automotive Engineers (SAE)
- G.Ciccarelli. "Applied Combustion ». Notes de cours. Queens University.
- M. Ehsani Y. Gao, S Gay & A. Emadi. « Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell vehicles. Fundamentals, Theory and Design ». CRC press. 2005.
- J.B. Heywood. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
- H. Mèmeteau. « Technologie fonctionnelle de l'automobile. Tome 1 Le moteur et ses auxiliaires ». 4ème édition. Dunod 2002.



Plan de l'exposé

- Historique
- Classification
- Technologie
 - Moteurs 4 temps Essence / Diesel
 - Moteurs 2 temps
- Courbes de performance
 - Couple, puissance
 - Consommation
 - Emissions
- Développements
 - Réduction de la consommation et des polluants



Définition

- Le moteur à combustion interne est une machine thermique qui convertit l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique, généralement sous forme d'un mouvement rotatif d'un arbre

Historique

- 1700: moteurs à vapeur
- 1860: Moteur de Lenoir (rendement $\eta \sim 5\%$)
- 1862 Beau de Rochas définit le principe du cycle de fonctionnement des moteurs à combustion interne
- 1867: Moteur de Otto & Langen: ($\eta \sim 11\%$ et rotation < 90 rpm)
- 1876: Otto invente le moteur à 4 temps à allumage par bougie ($\eta \sim 14\%$ et rotation < 160 rpm)
- 1880: Moteur deux temps
- 1892: Diesel invente le moteur quatre temps à allumage par compression
- 1957: Wankel invente le moteur à piston rotatif

Historique

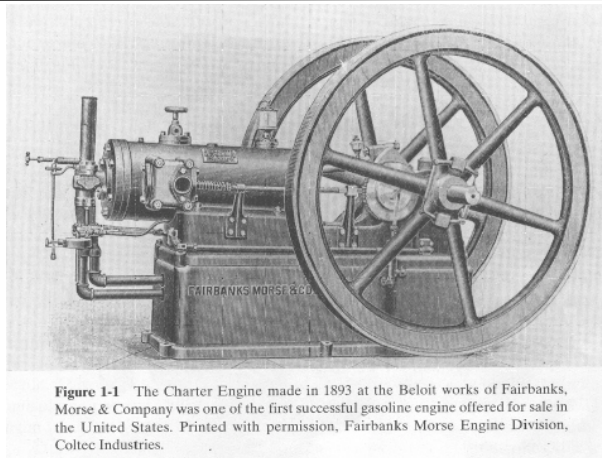


Figure 1-1 The Charter Engine made in 1893 at the Beloit works of Fairbanks, Morse & Company was one of the first successful gasoline engine offered for sale in the United States. Printed with permission, Fairbanks Morse Engine Division, Coltec Industries.



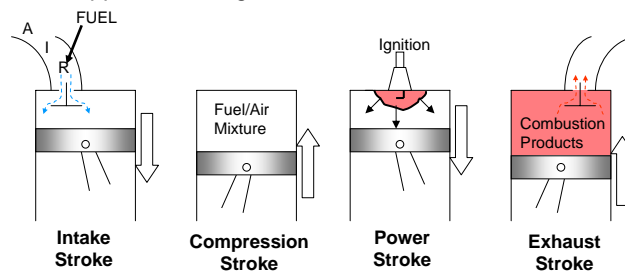
Classification

- Les moteurs à explosion (à essence):
 - La combustion du mélange air / essence est amorcée par l'étincelle d'une bougie d'allumage
 - Système d'allumage commandé
 - Le mélange air / essence peut s'effectuer par:
 - Carburateur
 - Injection directe d'essence
- Les moteurs à combustion (Diesel)
 - La combustion est déclenchée par l'injection du gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé.
 - Le mélange s'enflamme par auto inflammation, c'est-à-dire spontanément

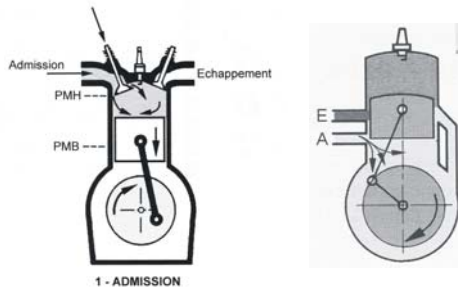


Classification

- Les quatre phases de fonctionnement du moteur ont été définies dès 1862 par Beau de Rochas:
 - Admission: aspiration d'air ou de mélange air / essence
 - Compression de l'air ou du mélange
 - Inflammation rapide et détente du piston
 - Echappement des gaz brûlés



Classification

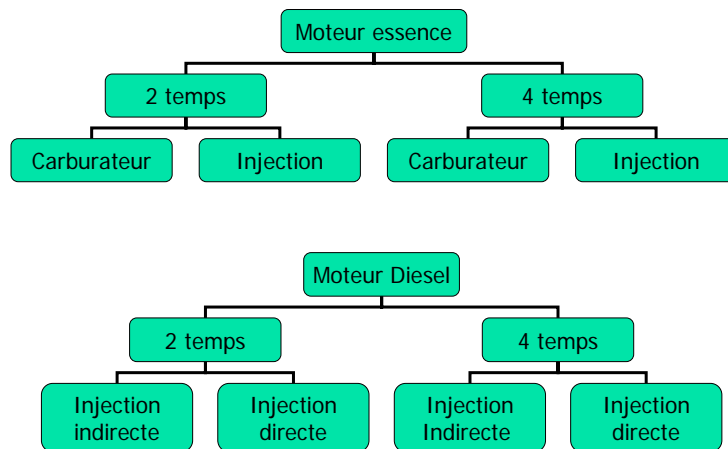


1 - ADMISSION



- Les **moteurs à quatre temps** réalise le cycle en quatre course de piston et deux tours de vilebrequin
- Les **moteurs à deux temps** réalisent le cycle en deux courses de pistons et un tour de vilebrequin
- Les **moteurs rotatifs**: le mouvement alternatif rectiligne est remplacé par la rotation d'un rotor qui réalise le cycle trois fois par tour

Classification





Classification: ne pas confondre...

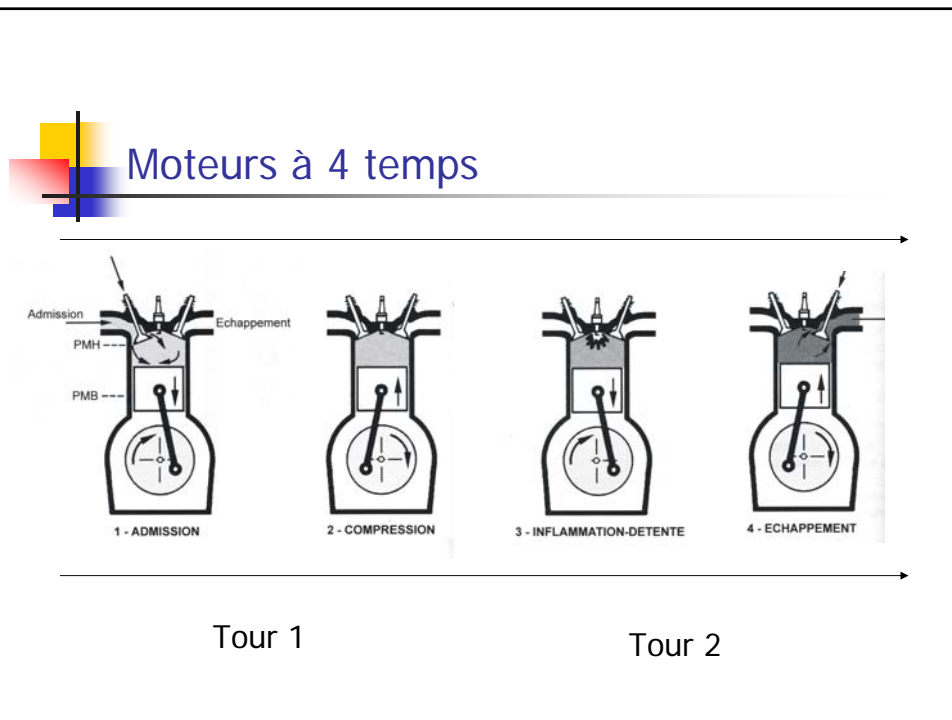
- **Injection indirecte d'essence:** injection d'essence à basse pression en amont de la soupape d'admission au temps d'admission
- **Injection indirecte de Diesel:** injection de gazole à haute pression dans une chambre de précombustion en de compression
- **Injection directe Diesel:** injection de gazole à très haute pression (2000 bars) directement dans le cylindre en fin de compression
- **Injection d'huile (moteur deux temps):** le mélange essence / huile est effectué par injection d'huile spéciale dans le carburant au temps d'admission



Classification

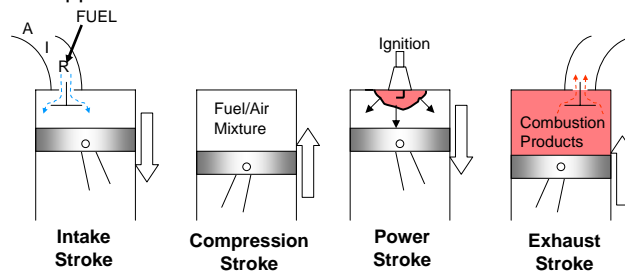
- **Moteur atmosphérique:**
 - Le mélange air/essence est injecté à la pression atmosphérique lors de la phase d'admission.
 - Le taux de remplissage du cylindre est toujours inférieur à 1.
 - La puissance est limitée par ce coefficient
- **Moteur turbocompressé:**
 - Le mélange air essence ou air est injecté avec une certaine surpression
 - La surpression est créé en faisant passer l'air d'admission dans un compresseur
 - Cela crée une suralimentation (taux de remplissage plus important)

Fonctionnement des moteurs

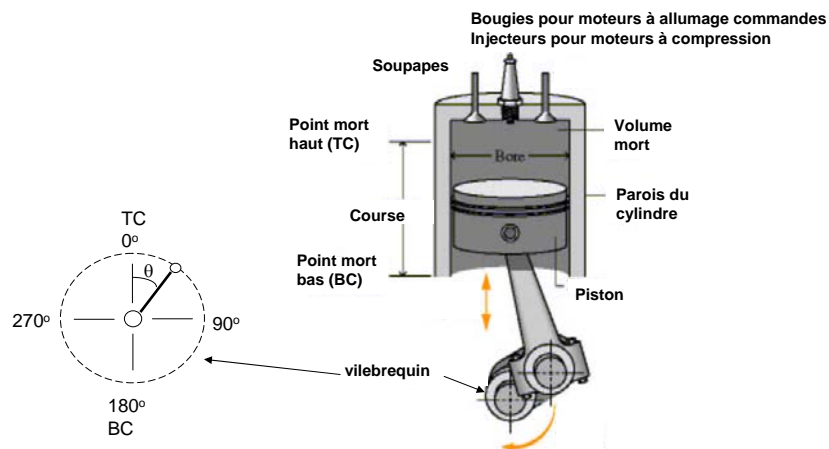


Moteurs à 4 temps: essence

- Temps 1: le mélange air/essence est introduit dans le cylindre par la soupape d'admission
- Temps 2: le mélange est comprimé
- Temps 3: La combustion du mélange (grosso modo à volume constant) survient et la détente des gaz de combustion produit un travail.
- Temps 4: Les gaz sont expulsés du cylindre par la soupape d'échappement



Moteurs à 4 temps





Moteurs à 4 temps

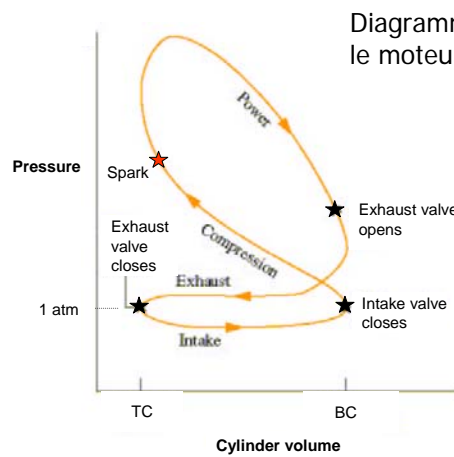


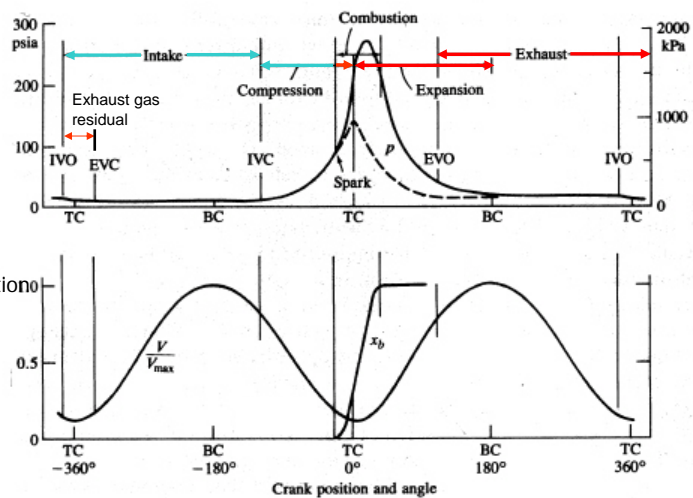
Diagramme pression volume pour le moteur 4 temps essence

Une explosion tous les 2 tours de vilebrequin



Moteurs à 4 temps

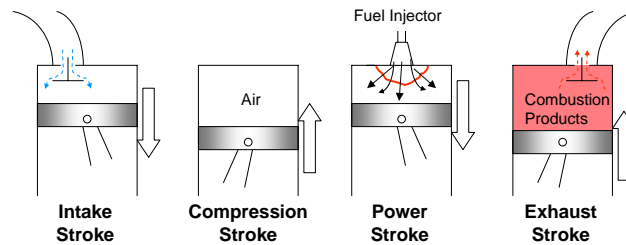
IVO intake valve open
IVC intake valve close
EVO exhaust valve open
EVC Exhaust valve close
 X_b burned gaz mole fraction



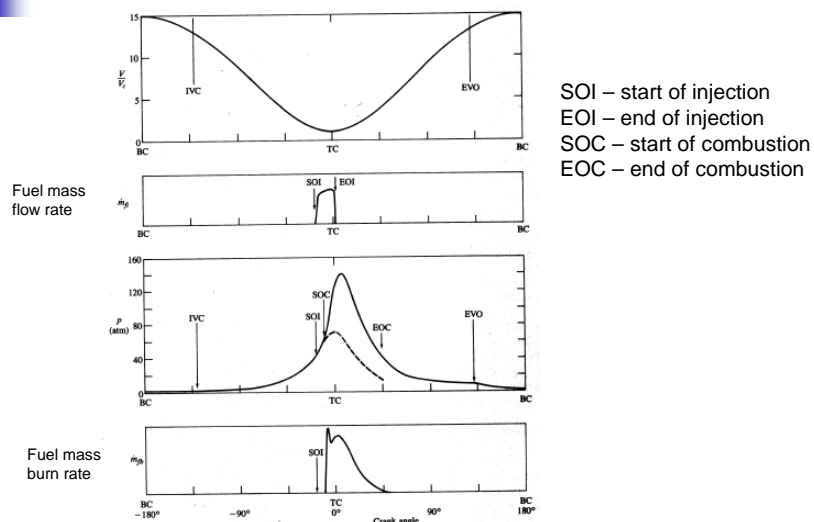


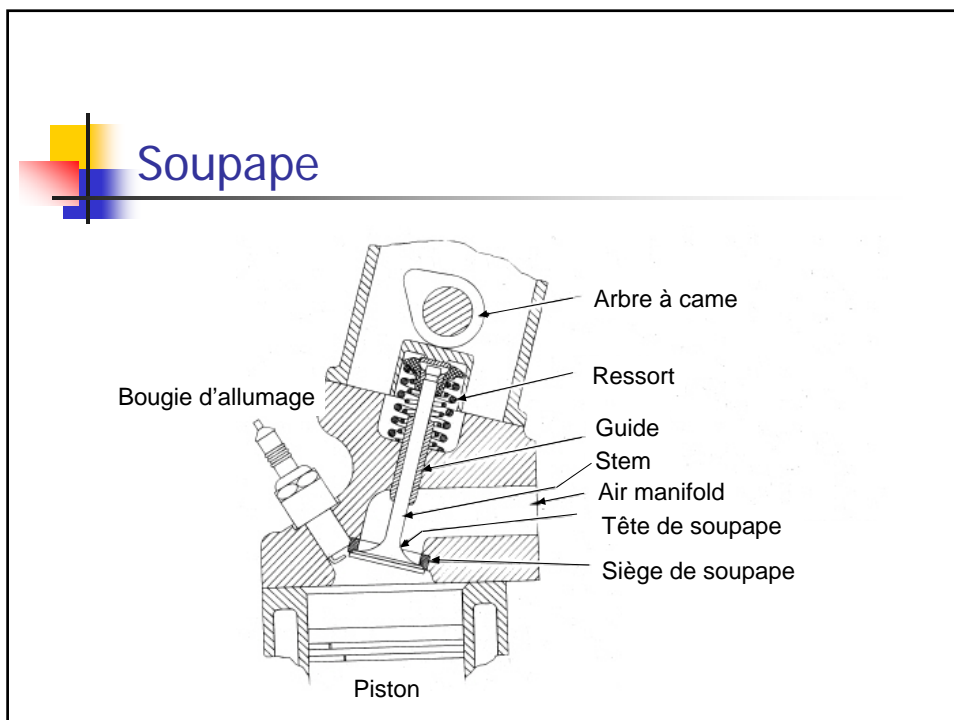
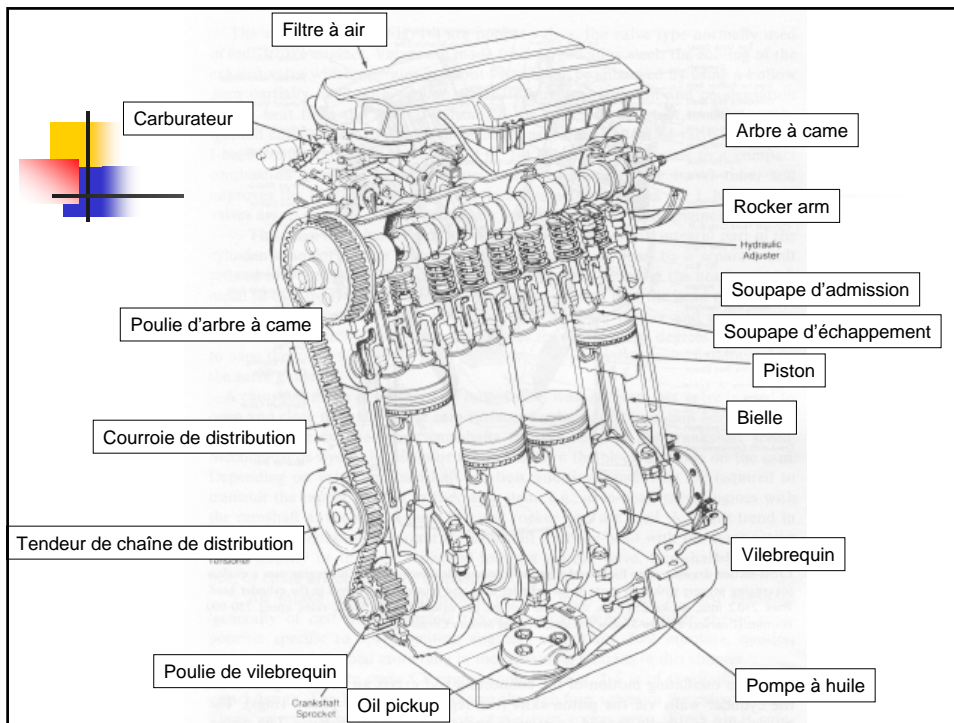
Moteurs à 4 temps: Diesel

- Temps 1: l'air (seul) est introduit dans le cylindre par la soupape d'admission
- Temps 2: l'air est comprimé
- Temps 3: le carburant est injecté et la combustion du mélange (grosso modo à pression constante) survient. La détente des gaz de combustion produit un travail.
- Temps 4: Les gaz sont expulsés du cylindre par la soupape d'échappement

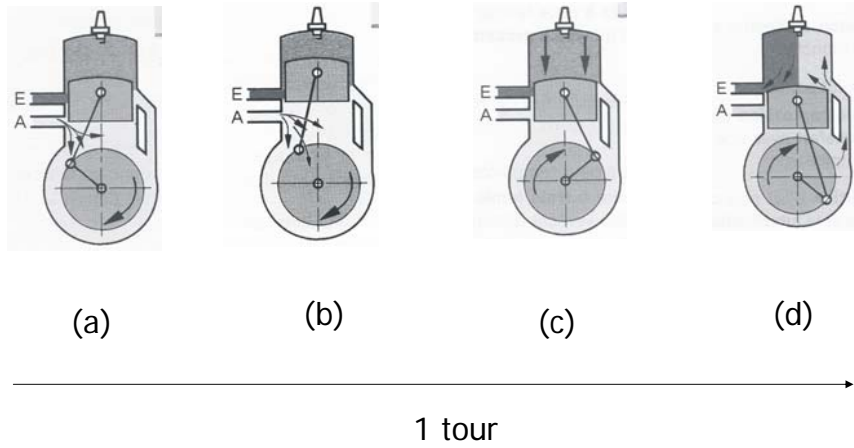


Moteurs à 4 temps: Diesel



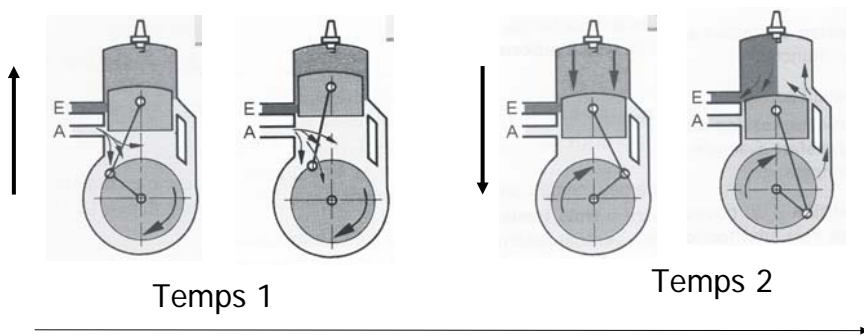


Moteurs à 2 temps



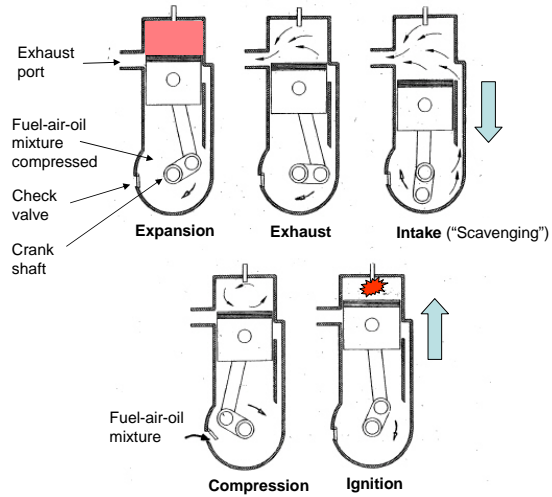
Moteurs à 2 temps: essence

- Temps 1 (piston montant): le mélange air / essence est introduit dans le cylindre et est comprimé. La combustion est initiée à la fin de course
- Temps 2: (piston descendant) les gaz produit de la combustion se détendent et produisent un travail.

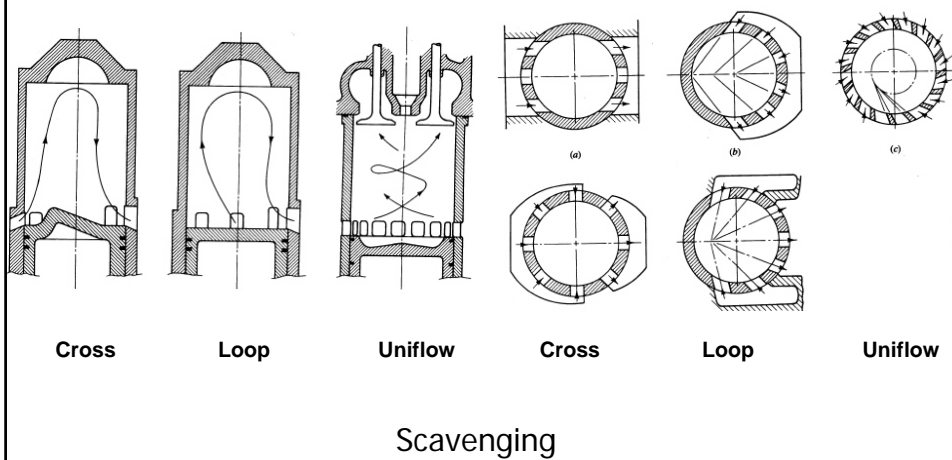


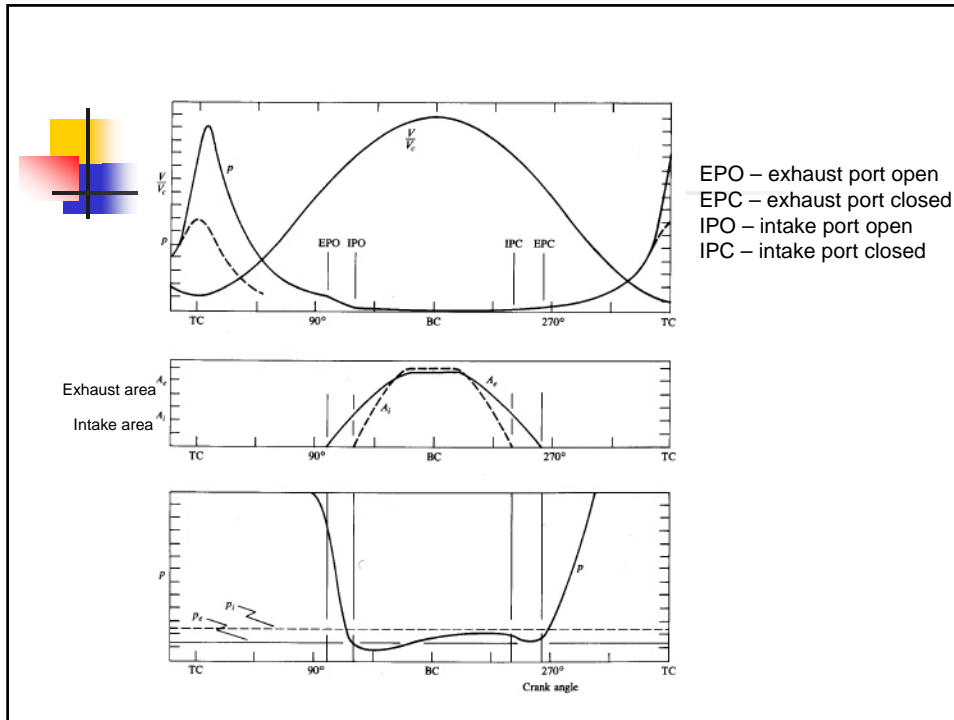


Moteurs à 2 temps: essence



Moteurs à 2 temps: essence





Avantages / inconvénients des moteurs 2 temps

- Avantages
 - Rapport puissance / poids plus grand puisqu'on a une explosion tout les tours de vilebrequin
 - Conception de soupape assez simple
 - Souvent utilisé pour les petits moteurs pour les tondeuses à gazon, les bateaux hors-bord, les motocyclettes
- Inconvénients
 - Renouvellement de la charge incomplet ou bien renouvellement trop important conduisant au by-pass
 - On brûle de l'huile mélangé au carburant



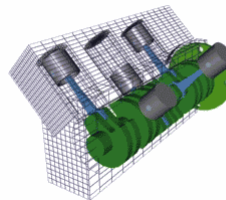
Nombre de cylindres

- Mono cylindre: donne une poussé tous les deux tours ou tous les tours de vilebrequin. Les variations du couple sont grandes et produisent des vibrations. La régularité du couple devient problématique
- Multicylindres: on répartit la cylindrée au gré des cylindres qui sont autant de petits moteurs. On augmente la fréquence des poussées.
- On peut réaliser l'équilibrage du moteur (équilibrage des différentes résultantes et moments des forces d'inertie jusqu'à un certain ordre) et augmenter les caractéristiques de régularité du couple.



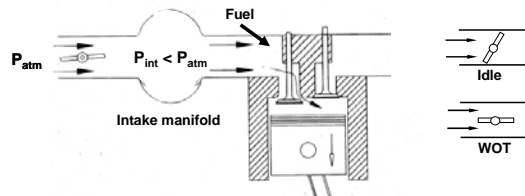
Nombre de cylindres

- Configurations les plus habituelles
 - En ligne: 2, 3, 4, 6
 - À plat: 2, 4
 - En V
 - En W
 - En U



Régulation de la puissance

- Un moteur à piston est à la base un moteur à air. Plus on injecte de l'air, plus on peut brûler du carburant
- La pression initiale dans le cylindre est égale à la pression atmosphérique
- La pression dans le système d'admission est modifiée en ouvrant ou fermant la manette des gaz, une papillon qui permet de changer la chute de pression
- Un flux d'air maximum (et donc une puissance max) est obtenue en maintenant la manette des gaz grande ouverte et minimum au ralenti

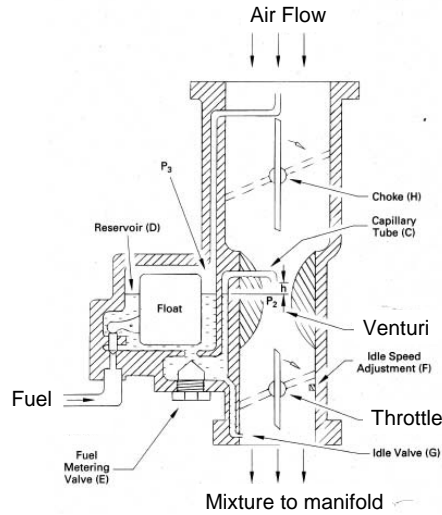


Mélange air fuel

- Pour les moteurs à allumage commandé, l'air et le fuel sont généralement mélangé avant d'entrer dans le cylindre
- Le ratio entre l'air et le fuel doit être dans des proportions quasi stochéométrique (environ rapport 1:15) afin d'avoir une combustion convenable.
- Initialement un dispositif purement mécanique, le carburateur était utilisé pour mélanger le carburant et l'air
- Les moteurs modernes utilisent des injection de carburant électronique et une sonde lambda pour connaître l'excès d'air.

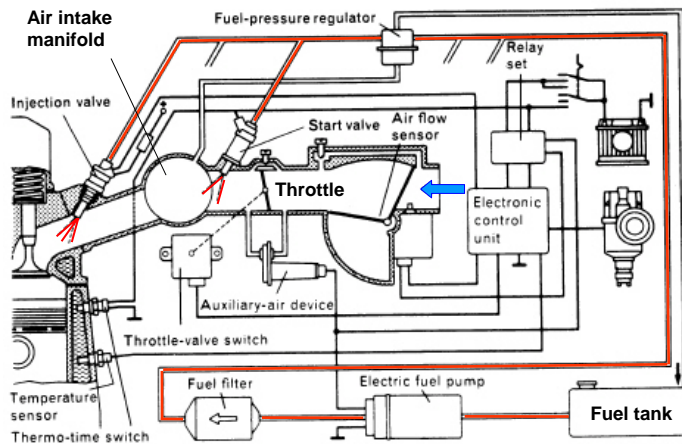


Carburateur de base



Système d'injection moderne

Au démarrage, les composants sont froids et l'évaporation du fuel est lente. On introduit donc un supplément de carburant via une seconde ligne d'injection



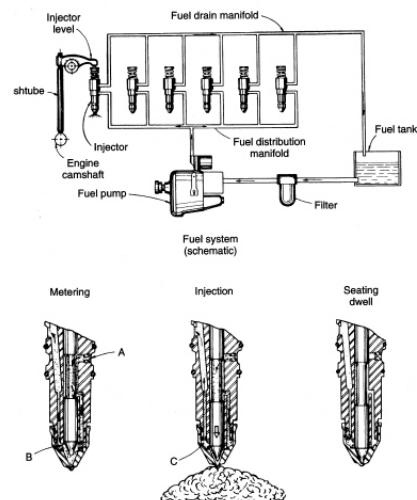


Système d'injection Diesel

- Avec les moteurs Diesel, le fuel est vaporisé directement dans le cylindre
- La puissance est variée en modifiant la quantité de carburant injectée (pas de papillon des gaz). On peut travailler avec un fort excès d'air.
- Le système d'injection opère à haute pression e.g. 100 Mpa car
 - La pression d'injection doit être plus grande que la pression de compression des gaz
 - On a besoin d'une grande vitesse de jet pour atomiser les gouttelettes de manière assez fines pour une évaporation rapide



Système d'injection Diesel



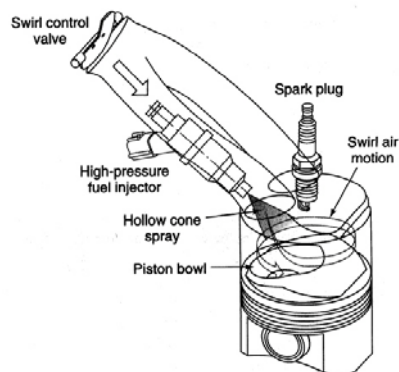


Moteur à injection directe

- Les moteurs hybrides combinent les meilleures caractéristiques des moteurs à allumage commandé et à compression.
 - Opérer au taux de compression optimum (12 à 15) pour un rendement maximum en injectant du carburant directement dans le moteur durant la compression (pour éviter le cognement associé aux moteurs à allumage avec pré mélange de la charge)
 - Allumer le carburant lorsqu'il se mélange (pour éviter les problèmes de qualité de carburant lié aux moteurs Diesel)
 - Contrôler la puissance du moteur en ajoutant du carburant (pour éviter le problème du papillon des gaz et diminuer les pertes par pompage)



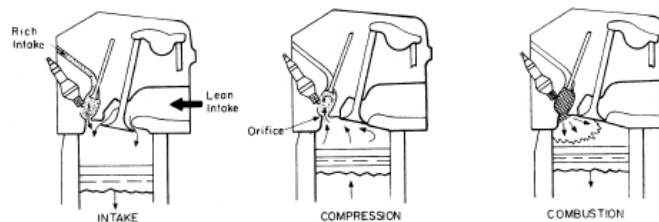
Moteur à injection directe



Requiert une cupule dans le piston pour permettre un mélange air carburant ultra rapide

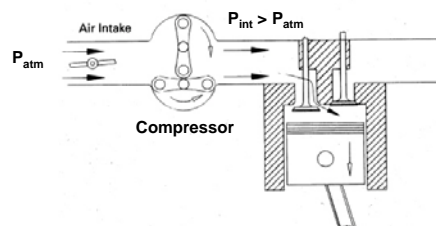
Moteurs à injection directe et charge stratifiée

- Créer un mélange air / carburant facilement inflammable autour de la bougie et un mélange pauvre (difficilement inflammable) dans le reste du cylindre
- La combustion en mélange pauvre donne lieu à des émissions plus faibles
- Exemple d'un moteur à torche ou allumage par jet



Suralimentation et turbochargeur

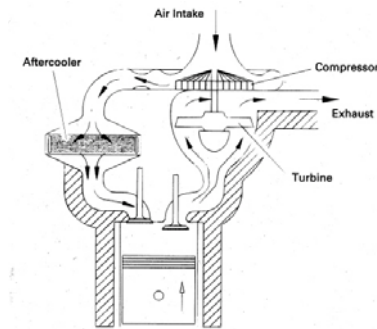
- Les turbo chargeurs et turbosoufflantes sont utilisées pour augmenter la puissance spécifique des moteurs en augmentant la pression d'alimentation et en autorisant de ce fait une plus grande quantité de carburant.
- Les phénomènes de cognement et auto inflammation limitent le taux de pré compression
- Les **turbosoufflantes** sont des compresseurs qui sont mécaniquement entraînés par le vilebrequin du moteur et représentent donc une ponction de puissance





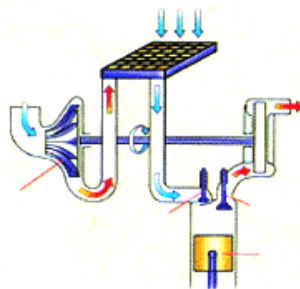
Suralimentation et turbo chargeur

- Les turbo chargeurs sont des compresseurs accouplés avec une petite turbine entraînée par les gaz d'échappement. La vitesse de la turbine est fonction de la vitesse de rotation du moteur



Suralimentation et turbo chargeur

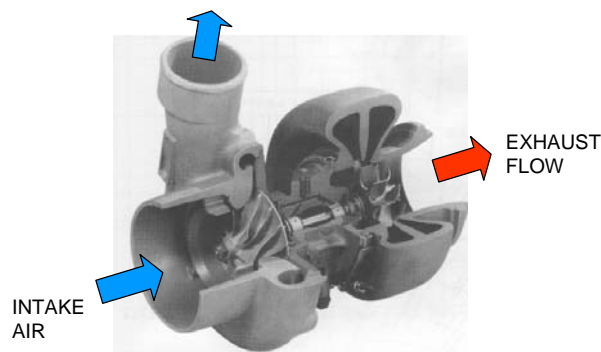
- Le compresseur augmente malheureusement la température des gaz d'admission de sorte qu'ils sont généralement accouplé à un intercooler pour abaisser la température et augmenter la densité de l'air et donc le taux de remplissage.



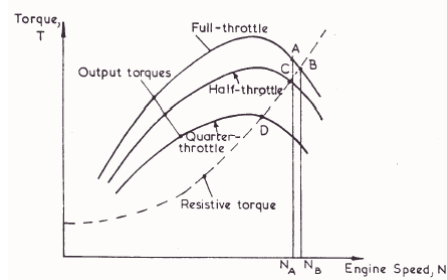
Suralimentation et turbo chargeur

- Le pic de pression dans le système d'échappement est seulement faiblement supérieur à la pression atmosphérique de sorte qu'on n'a qu'un petit Δp à travers la turbine.
- Pour produire la puissance nécessaire au compresseur, la vitesse de la turbine doit être très grande (100 à 200 000 tr/min).
- En outre on est sujet au phénomène de retard du turbo (turbo lag) car il faut un certain temps à la turbine pour monter en régime après une ouverture soudaine de la manette des gaz.
- Une vanne de « Waste gate » est utilisée pour contrôler le débit de gaz d'échappement qui traverse la turbine. Elle est asservie à la pression de la pipe des gaz d'admission.

Suralimentation et turbo chargeur

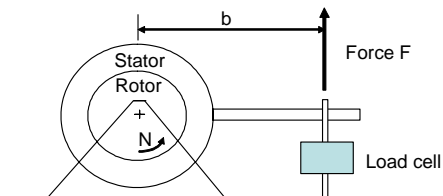


Courbes de performance



Mesure de la puissance et du couple d'un moteur

- Le couple est mesuré sur l'arbre de sortie connecté au vilebrequin en utilisant un dynamomètre

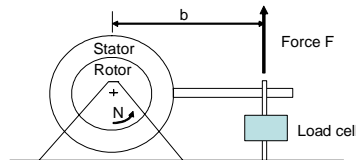


- Le couple C exercé par le moteur est donné par

$$C = F \cdot b \quad \text{unités: Nm = J}$$

Mesure de la puissance et du couple d'un moteur

- Le couple est mesuré sur l'arbre de sortie connecté au vilebrequin en utilisant un dynamomètre



- La puissance \dot{W} délivrée par le moteur tournant à la vitesse N et absorbée par le frein est

$$\dot{W} = \omega \cdot C = (2\pi \cdot N) \cdot C \quad \text{units: } \left(\frac{\text{rad}}{\text{rev}}\right) \left(\frac{\text{rev}}{\text{s}}\right) (\text{J}) = \text{Watt}$$

- NB: ♦ la vitesse de rotation du moteur en rad/s

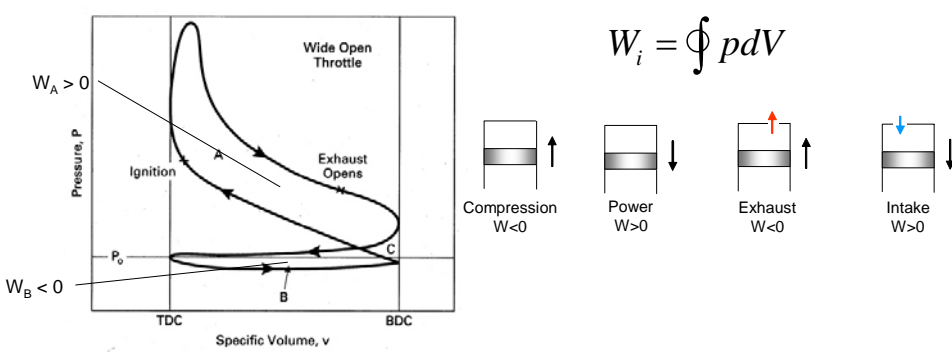
Mesure de la puissance et du couple d'un moteur

- Le **couple** est la mesure du moteur à produire un travail tandis que la puissance décrit le taux avec lequel il est capable de développer ce travail.
- Le terme de **puissance effective**, développée au frein \dot{W}_b , est utilisé pour décrire la puissance mesurée à l'arbre de sortie, soit la puissance utilisable et transférable à la charge.
- La puissance au frein est inférieure à la **puissance indiquée** générée par le gaz dans les cylindres à cause des pertes par friction et des charges parasites des auxiliaires (pompes à eau et à air, compresseur...)
- La puissance produite dans le cylindre par les gaz est appelée **puissance indiquée** \dot{W}_i .



Travail thermodynamique du gaz

- On peut relever les données de pression dans le cylindre au cours du cycle de fonctionnement du moteur. Les données sont typiquement présentées sous la forme d'un diagramme (p,V)
- Le travail thermodynamique du fluide est donné par



Travail thermodynamique du gaz

- Travail net par cycle: travail net thermodynamique au cours des temps de compression et d'expansion:

$$W_{i,g} = \text{area A} + \text{area C} (>0)$$
- Travail de pompage: travail net fourni au gaz pendant l'admission et l'échappement:

$$W_p = \text{area B} + \text{area C} (<0)$$
- Travail net total par cycle: travail délivré sur l'ensemble des 4 temps

$$W_{i,n} = W_{i,g} - W_p = (\text{area A} + \text{area C}) - (\text{area B} - \text{area C}) = \text{area A} - \text{area B}$$



Travail thermodynamique du gaz

- Puissance indiquée (thermodynamique)

$$\dot{W}_i = \frac{W_i N}{n_R} \quad \frac{(kJ/cycle)(rev/s)}{rev/cycle}$$

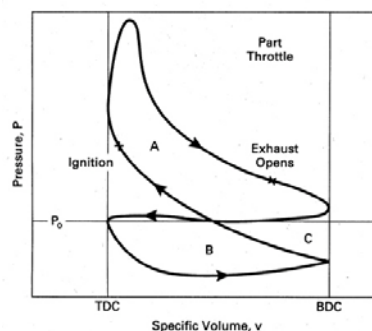
- Avec N, vitesse de rotation du vilebrequin en tr/s
n_R le nombre de tour de vilebrequin par cycle: soit 2 pour le moteur 4 temps et 1 pour le moteur 2 temps
- La puissance augmente en augmentant:
 - La taille du moteur V_d
 - Le rapport de compression r_c
 - La vitesse du moteur N



Travail thermodynamique du gaz

Travail thermodynamique à charge partiel (manette des gaz partiellement ouverte)

- A pleine charge le papillon est complètement ouvert et la pression d'admission est juste en dessous de la pression atmosphérique
- A charge partielle, le papillon est partiellement fermé et la pression d'admission baisse, ce qui augmente beaucoup le travail de pompage Aire B+C





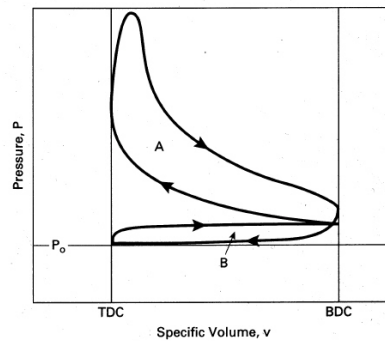
Travail thermodynamique du gaz

Travail thermodynamique avec suralimentation

- Les moteurs suralimentés et turbochargés ont des pressions d'alimentation plus grande que la pression atmosphérique donnant lieu à un travail de pompage positif

$$W_i, n = \text{area } A + \text{area } B$$

- Toutefois ce gain de travail se fait au dépend d'une dépense d'énergie dans le compresseur, énergie prise à l'arbre



Rendement mécanique du moteur

- Une partie de la puissance thermodynamique libérée par le fluide est perdue pour vaincre les frictions internes du moteurs et pour pomper le gaz dans et hors du moteur.
- La puissance des frottements \dot{W}_f est utilisée pour désigner collectivement la puissance consommées par ces pertes

$$\dot{W}_f = \dot{W}_{i,g} - \dot{W}_b$$

- Le rendement mécanique du moteur est alors défini comme suit:

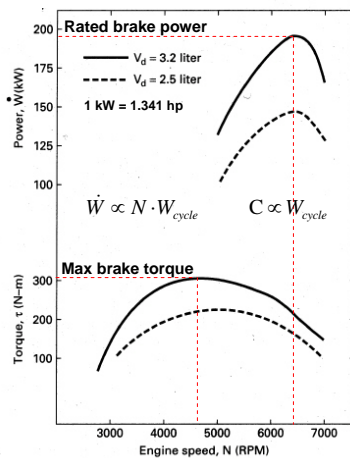
$$\eta_m = \frac{\dot{W}_b}{\dot{W}_{i,g}} = 1 - \frac{\dot{W}_f}{\dot{W}_{i,g}}$$

Rendement mécanique du moteur

- Le rendement mécanique du moteur dépend de la position de la manette des gaz, de la conception du moteur, et de la vitesse de rotation du moteur.
- Valeurs typiques pour des moteurs de voiture à manette des gaz complètement ouverte
 - 90% @ 2000 rpm et 75% @ régime maximum
- La fermeture de la manette des gaz augmente le travail de pompage, réduit le travail effectif et donc diminue le rendement mécanique. Le rendement tombe à zéro au ralenti.
- La puissance varie avec la vitesse mais le couple reste faiblement dépendant

$$\dot{W} \propto N \cdot W_{\text{cycle}} \quad \text{et} \quad \dot{W} \propto N \cdot C \quad \Rightarrow \quad C \propto W_{\text{cycle}}$$

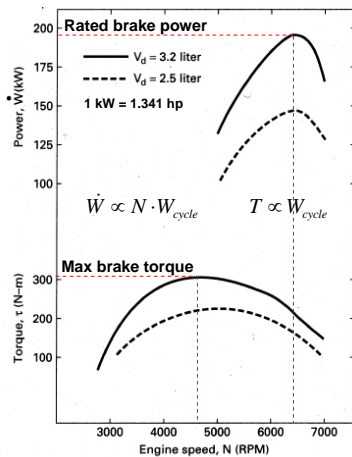
Puissance et couple en fonction du régime



- On observe un maximum dans la courbe de puissance en fonction du régime appelé puissance nominale
- Avec les hauts régimes, la puissance effective diminue à cause de l'augmentation significative des pertes par friction comparativement à la puissance indiquée

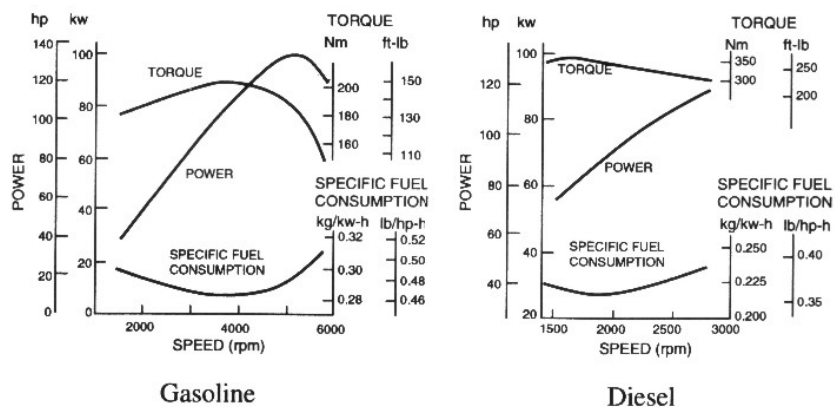
$$\dot{W}_b = \dot{W}_{i,g} - \dot{W}_f$$

Puissance et couple en fonction du régime



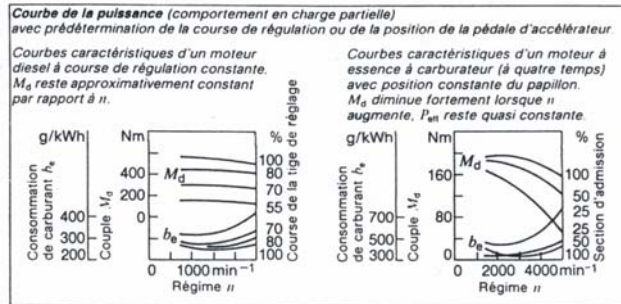
- On observe également un maximum dans la courbe de couple en fonction du régime appelé couple maximal du moteur
- Le couple maximum décroît:
 - À bas régime à cause des pertes de chaleur au paroi car le temps de séjour dans le cylindre devient plus long
 - A haut régime à cause de l'augmentation des pertes par friction, notamment par l'augmentation des pertes par pompage et de la diminution du remplissage du cylindre

Courbes de performance des moteurs essence et diesel (4 temps)



Gillespie, Fig. 2.1

Courbes de couples des moteurs essence et Diesel



LE COMPORTEMENT À CHARGE PARTIELLE:

- Courbes plus plates pour régulières pour le Diesel
- Chute de couple à haute vitesse pour l'essence et surtout à charge partielle

Notion de pression moyenne indiquée

- La **pression moyenne indiquée** pmi ou imep est une pression constante fictive qui produirait le même travail par cycle en poussant sur le piston pendant toute la durée de la course du piston dans la phase d'expansion

$$imep = \frac{W_i}{V_d} = \frac{\dot{W}_i \cdot n_R}{V_d \cdot N} \rightarrow \dot{W}_i = \frac{imep \cdot V_d \cdot N}{n_R} = \frac{imep \cdot A_p \cdot \bar{U}_p}{2 \cdot n_R}$$

- La pmi ne dépend que faiblement de la vitesse de rotation, mais du travail du piston comme le couple

$$\text{Puisque } T \propto W_{cycle} \text{ alors } imep \propto T$$

- La pression pmi est un meilleur indicateur que le couple pour comparer les moteurs et leur design, car il est indépendant de la vitesse de rotation N et de la taille du moteur V_d .



Notion de pression moyenne effective

- De manière similaire on définit la **pression moyenne effective** pme ou bmep comme la pression constante qui donnerait le même travail à l'arbre si elle agissait de manière constante durant le temps d'expansion

$$bmep = \frac{W_b}{V_d} = \frac{2\pi \cdot C \cdot n_R}{V_d} \rightarrow C = \frac{bmep \cdot V_d}{2\pi \cdot n_R}$$



Pressions moyennes indiquée et effective

- Ordre de grandeur pour la pression moyenne effective des moteurs actuels:
 - Moteurs à quatre temps:
 - Atmosphérique
 - Moteurs à allumage commandé: 850 – 1050 kPa
 - Moteurs à allumage compression: 700 – 900 kPa
 - Turbochargé
 - Moteurs à allumage commandé : 1250 - 1700 kPa
 - Moteurs à allumage compression : 1000 - 1200 kPa
 - Moteurs à deux temps
 - Moteurs à allumage commandé standard: idem 4 temps
 - Grand moteurs diesel 2 temps (e.g. bateau) ~1600 kPa
 - NB
 - Pme à couple maximum, manette des gaz ouverte
 - A puissance nominale, la pme est plus basse de l'ordre de 10 à 15%

Pressions moyennes indiquée et effective

| Vehicle | Engine type | Displ. (L) | Max Power (HP@rpm) | Max Torque (lb-ft@rpm) | BMEP at Max BT (bar) | BMEP at Rated BP (bar) |
|-----------------------|-------------|------------|--------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Mazda Protégé LX | L4 | 1.839 | 122@6000 | 117@4000 | 10.8 | 9.9 |
| Honda Accord EX | L4 | 2.254 | 150@5700 | 152@4900 | 11.4 | 10.4 |
| Mazda Millenia S | L4 Turbo | 2.255 | 210@5300 | 210@3500 | 15.9 | 15.7 |
| BMW 328i | L6 | 2.793 | 190@5300 | 206@3950 | 12.6 | 11.5 |
| Ferrari F355 GTS | V8 | 3.496 | 375@8250 | 268@6000 | 13.1 | 11.6 |
| Ferrari 456 GT | V12 | 5.474 | 436@6250 | 398@4500 | 12.4 | 11.4 |
| Lamborghini Diablo VT | V12 | 5.707 | 492@7000 | 427@5200 | 12.7 | 11.0 |

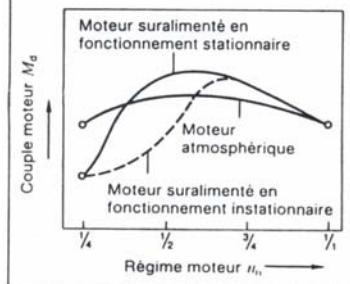
Pression moyenne effective

$$bmep = \frac{W_b}{V_d} = \frac{2\pi \cdot C \cdot n_R}{V_d}$$

- Le maximum de la pme est obtenu avec manette des gaz ouverte à un régime particulier généralement correspondant au point de design du moteur
- Fermer le papillon des gaz réduit la pme
- Pour une cylindrée, une valeur supérieure de la pme conduit à un couple supérieur
- Pour un couple donné, une valeur supérieure de la pme donne un moteur plus petit
- Plus de pme donne lieu à des contraintes mécaniques et thermiques sur le moteur et les pistons, ou une durée de vie réduite ou un moteur renforcé
- Pour la même pme les moteurs deux temps sont deux fois plus puissant

Effet de la suralimentation

Courbes caractéristiques de couple pour moteurs turbocompressés en fonctionnement stationnaire et instationnaire en comparaison avec moteur atmosphérique.



- La suralimentation des moteurs à pistons modifie l'allure du couple relatif.
- Elle ne devient favorable qu'au delà d'un certain régime, d'où manque de souplesse et de reprises à bas régime des moteurs suralimentés

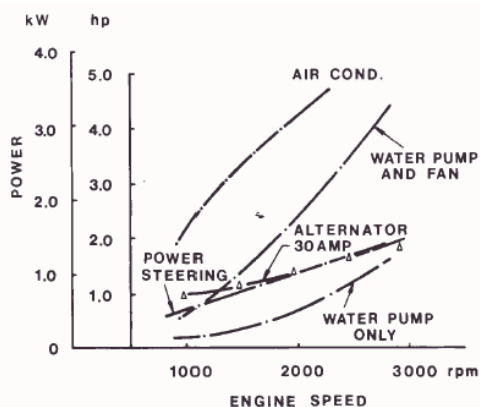
Normalisation des performances

- Diagrammes fournis par les fabricants représentent la puissance brute du moteur
- Performance brute = performance avec équipement requis pour assurer le mouvement: ventilateur, pompe à eau, pompe à huile, échappement, filtre à air
- On n'oubliera pas que la multiplication des accessoires modernes (air conditionné, direction assistée, système de freinage, alternateur électrique) amputent une partie non négligeable de puissance transmise aux roues.

Normalisation des performances

- SAE (Society of Automotive Engineers, USA): puissance du moteur dépourvu de tous ses accessoires, réglages des paramètres (avance à l'allumage, carburateur) réajustés pour chaque régime. Puissance idéale théorique.
- DIN (Deutsche Industrie Normen) et CE. Le moteur doit entraîner tous ses accessoires, les réglages ne pouvant pas être modifiés en cours d'essai (réglages de série).
- CUNA. Système italien compromis entre norme DIN et SAE: pas d'accessoire, mais réglages de série.

Effet de la consommation des accessoires



- La consommation des accessoires qui se multiplie peut avoir un impact significatif sur les performances, spécialement pour les petits moteurs et les véhicules électriques



Effet des conditions atmosphériques

- Les conditions atmosphériques (Température, pression, hygrométrie) affectent également les performances du moteur.
- Conditions atmosphériques de référence:
 - $T^\circ = 15.5^\circ\text{C} = 520^\circ\text{R} = 60^\circ\text{F}$
 - $p = 101.32 \text{ kPa} = 14.7 \text{ psi} = 76 \text{ cm de Hg}$
- Wong cite des formules de corrections proposées par Taborek (1956) dans lesquelles :
 - B_a la pression barométrique
 - T la température (en °R) à l'admission d'air
 - B_v la pression de vapeur pour tenir compte de l'effet de l'humidité



Effet des conditions atmosphériques

- Pour un moteur essence

$$P = \frac{P_0(B_a - B_v)}{B_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}}$$

- Pour les moteurs diesel l'effet des conditions atmosphériques est plus compliqué:

$$P = \frac{P_0(B_a - B_v)}{B_0} \frac{T_0}{T}$$

- Les conditions atmosphériques peuvent changer les performances de manière considérable (Wong Fig. 3.24)



Effet des conditions atmosphériques

- Norme EEC 80/1269 – ISO 1585 – JIS D 1001 – SAE J1349 pour le moteur à allumage commandé (essence)
- Conditions standards (température $T_0 = 298$ K et pression d'air sec $p_0 = 99$ kPa)

$$\alpha_a = A^{1.2} B^{0.6}$$

$$A = 99 / p_{PT} \text{ (kPa)}$$

$$B = T_p \text{ (K)} / 298$$

- Puissance corrigée

$$P_0 = \alpha_a P$$



Effet des conditions atmosphériques

- Norme EEC 80/1269 – ISO 1585 – JIS D 1001 – SAE J1349 pour le moteur à allumage par compression (diesel)
- Conditions standards (température $T_0 = 298$ K et pression d'air sec $p_0 = 99$ kPa)

$$\alpha_a = A^{0.7} B^{1.5}$$

$$A = 99 / p_{PT} \text{ (kPa)}$$

$$B = T_p \text{ (K)} / 298$$

- Puissance corrigée

$$P_0 = \alpha_a P$$



Consommation du moteur thermique

- La *consommation spécifique* du moteur est la quantité de carburant (m_f) utilisée pour produire un travail T donné:

$$b_e = \frac{m_f}{T_{mot}}$$

- Pour un fonctionnement en régime variable:

$$dT_{mot} = \mathcal{P}_{mot} dt$$

$$dm_f = \dot{m}_f dt$$

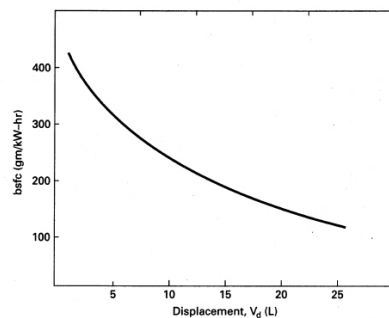
$$b_e = \frac{\dot{m}_f}{\mathcal{P}_{mot}}$$

- La consommation spécifique dépend du point de fonctionnement du moteur
- Elle est cartographiée sur le diagramme puissance ou couple en fonction du régime



Consommation du moteur thermique

- La consommation spécifique (bfsc) des moteurs diminue généralement avec la taille du moteur, car on réduit les pertes de chaleur aux parois du cylindre
- NB: le rapport surface du cylindre / volume du cylindre diminue avec le diamètre d'alésage

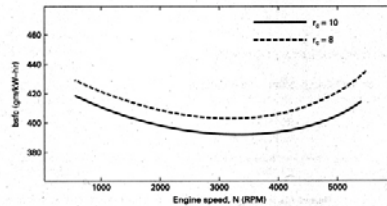


$$\frac{\text{cylinder surface area}}{\text{cylinder volume}} = \frac{2\pi r L}{\pi r^2 L} \propto \frac{1}{r}$$



Consommation du moteur thermique

- Il y a un minimum dans la courbe de consommation spécifique par rapport au régime (approximativement situé au régime de couple maximal)

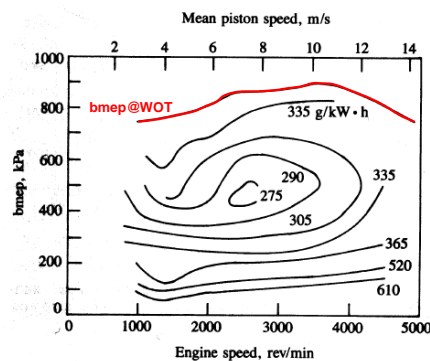


- A haut régime, la consommation augmente à cause des pertes par friction
- A bas régime, la consommation augmente à cause du temps plus grand disponible pour les pertes de chaleur dans le cylindre et le piston
- La consommation diminue avec le rapport de compression à cause du meilleur rendement thermodynamique du cycle



Consommation du moteur thermique

- On utilise généralement une cartographie de la consommation pour représenter son évolution en fonction du taux de charge et du régime.

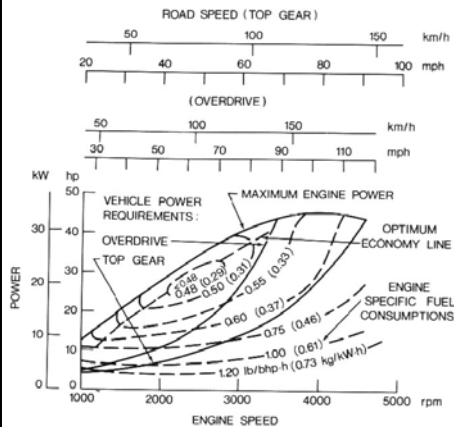


$$bmep = \frac{2\pi \cdot C \cdot n_R}{V_d}$$

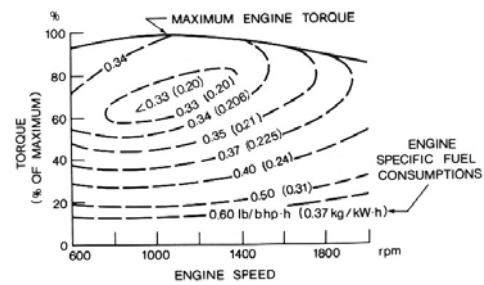
$$\dot{W}_b = (2\pi \cdot N) \cdot C$$

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_b}$$

Consommation spécifique du moteur



Moteur essence



Moteur diesel

Wong, Fig. 3.41 et 3.42

Consommation spécifique du moteur

- On peut également parler de *rendement* énergétique, ratio entre la quantité d'énergie mécanique que l'on peut extraire d'un Kg de combustible ayant un PCI H_{fuel}

$$\eta_e = \frac{\mathcal{T}_{mot}}{m_f H_{fuel}}$$

- Soit encore

$$\eta_e = \frac{\mathcal{P}_{mot}}{\dot{m}_f H_{fuel}}$$



Consommation spécifique du moteur

- Les notions de rendement et de consommation spécifique sont liées par la relation:

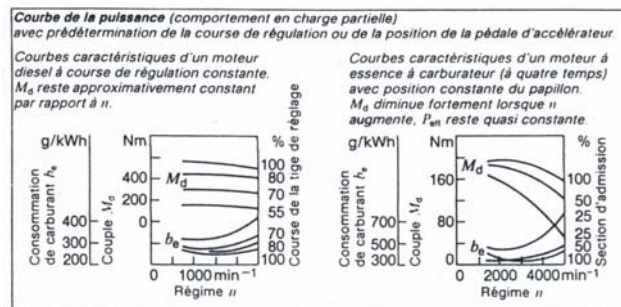
$$\eta_e = \frac{1}{b_e H_{fuel}}$$

- PCI habituels

| Carburant | PCI massique (kJ/kg) à 15 °C |
|----------------------------|------------------------------|
| Shell Formula Super 95 | 42900 |
| Gepel-Butagaz | 46000 |
| Shell Formula Diesel Plus | 42600 |
| Esther méthylique de colza | 37700 |
| Diméthyl éther | 28430 |
| Ethanol | 26900 |
| Hydrogène | 119930 |



Consommation spécifique du moteur



LE COMPORTEMENT À CHARGE PARTIELLE:

- Augmentation de la consommation plus rapide pour les moteur à essence
 - À haute vitesse
 - À charge partielle



Rendement volumétrique des moteurs

- A cause du temps de cycle très court et des pertes de charges dans l'écoulement de l'air lors de l'admission et de l'échappement, la quantité d'air admis est loin d'être idéale
- Le rendement volumétrique du moteur à admettre l'air est défini par:

$$\eta_v = \frac{\text{air effectivement admis}}{\text{quantité theor. air}} = \frac{m_a}{\rho_a \cdot V_d} = \frac{n_R \cdot \dot{m}_a}{\rho_a \cdot V_d \cdot N}$$

- Où ρ_a est la densité de l'air aux conditions atmosphériques p_0 , T_0 , soit pour un gaz parfait: $\rho_a = p_0 / R_a T_0$, avec $R_a = 0,287$ kJ/kg*K
- Les valeurs typiques pour papillons d'admission complètement ouvert sont de l'ordre de 75 à 90% et chute lorsqu'on la ferme.



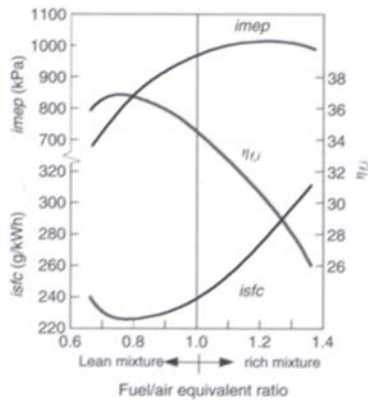
Richesse (Air fuel ratio)

- Pour que la combustion puisse avoir lieu, on doit introduire une quantité appropriée d'air (21% oxygène) et de carburant dans le cylindre.
- On définit la richesse du mélange (air fuel ratio)

$$AF = \frac{m_a}{m_f} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

- Compte tenu de la proportion d'oxygène dans l'air, le rapport stochéométrique pour de l'essence et le Diesel est de l'ordre de 15, avec une combustion possible dans l'intervalle 6 à 19.
- Pour les moteurs à essence, l'AF est dans l'intervalle 12 (riche) à 18 (pauvre) en fonction des conditions d'opération
- Pour les moteurs Diesel, le mélange est fortement non homogène, l'AF est dans l'intervalle 18 à 70

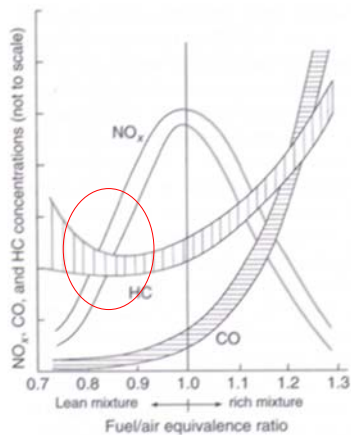
Richesse (Air fuel ratio)



$$\phi = 1/AF$$

- La richesse est un élément crucial pour les performances, le rendement et le contrôle des émissions du moteur
- La imep est maximum pour un mélange légèrement riche ($\phi \sim 1,2$)
- Le rendement diminue avec ϕ car il y a des imbrûlés. Pour un mélange trop pauvre cependant, les moteurs à allumage commandé peuvent ne plus être capables de provoquer l'allumage et deuxièmement la température baisse conduisant à une plus faible pression moyenne effective

Richesse (Air fuel ratio)



- La richesse a une effet important sur le contrôle des émissions des moteurs à allumage commandés
- Mélange maigres produisent moins de NO_x, HC et CO jusqu'à ce que le mélange devienne pauvre.
- Courbe très différente du NO_x qui a tendance à se former au mélange stochéométrique car lié à la présence de points chauds et de fortes pressions
- Contrôle des émissions est un problème complexe.



Contrôle des émissions



Contrôle des émissions

- Trois techniques:
 - Traitement du carburant
 - Amélioration du moteur
 - Post traitement des gaz d'échappement
- Carburant:
 - Composition modifiée par des additifs ou via le processus de raffinage pour éliminer les polluants ou faciliter le processus de post traitements de gaz d'échappement
 - Plomb utilisé pour augmenter le taux d'octane est remplacé du Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE), moins agressif pour l'environnement
 - Soufre: désulfuration des carburants pour éviter les H₂S et ne pas endommager les pots catalytiques



Contrôle des émissions

- Conception du moteur afin de diminuer la formation des polluants
 - Admission: prise d'air frais pour l'admission afin de diminuer les températures dans le cylindre et réduire la formation de NOx
 - Amélioration de l'homogénéité du mélange par l'injection électronique et par la turbulence du flux d'admission
 - Block moteur en aluminium pour permettre un fonctionnement du moteur à plus basse température
 - Soupapes d'échappement remplies de sodium liquide pour un meilleur refroidissement
 - Tête de piston recouverte de matériaux résistants pour diminuer le transfert de chaleur au piston
 - Utilisation de sonde lambda pour contrôler le taux d'oxygène dans l'échappement
 - ...



Contrôle des émissions

- Post traitement des gaz d'échappement
 - Reste le moyen le plus efficace pour réduire le taux de polluants
 - Le pot catalytique est un dispositif habituel (obligatoire en EU et aux USA) pour réduire les polluants des gaz d'échappement
 - Le pot catalytique est composé de matériaux catalytiques (Pt, Rh) qui favorisent la réduction des CO, HC et NOx en composés peu agressifs:
 - $2 \text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$
 - $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
 - $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$
 - Le catalyseur trois voies réalise ces trois opérations simultanément.
 - Le catalyseur n'agit qu'en température, de sorte que la majeure partie des émissions provient de la première minute de fonctionnement après le démarrage à froid.

Contrôle des émissions

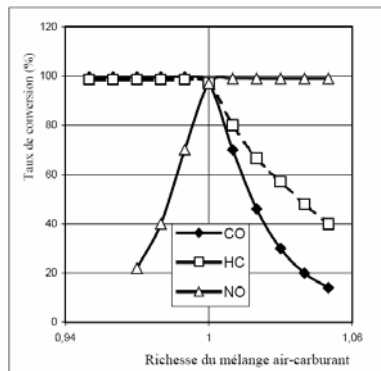


Figure 3 : Principe de fonctionnement d'un catalyseur 3 voies

- Post traitement des gaz d'échappement
 - Le catalyseur trois voies demande la présence d'oxygène dans les échappement (donc un léger excès d'oxygène dans l'admission) et un ajustement assez précis de la richesse du mélange.
 - Cette régulation est possible avec la mesure du taux d'oxygène (sonde lambda) et une injection électronique.

Actualité dans le développements des moteurs



Moteurs essence

- Le moteur à essence bénéficie de systèmes de post-traitement basés sur des catalyseurs à 3 voies qui éliminent simultanément le CO, les HC et les NOx
 - Possible d'atteindre des niveaux d'émission extrêmement bas
- Défi du moteur à essence, c'est la réduction de la consommation et des émissions de CO₂.
 - Écart de 20% avec les moteurs diesel
 - Réduction des pertes liées aux transferts de gaz et aux flux thermiques aux parois



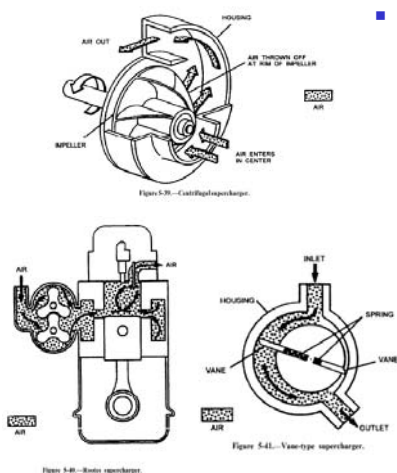
Moteurs essence

- Voies pour réduire l'émission de CO₂:
 - Injection directe
 - Combustion stratifiée: gains de 10 à 15% sur le cycle NDEC
 - Nouveaux procédés de combustion CAI (Controlled Auto Ignition): gains de 10 à 15%
 - Système à distribution variable : gains entre 7 et 13%
 - Approche de downsizing basée sur la suralimentation par turbocompresseur et réduction de la cylindrée avec maintien des performances

Admission variable, Suralimentation et Turbocompresseurs

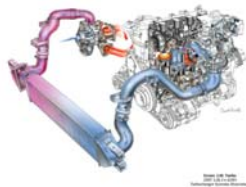
- Le travail et le couple dépendent du taux de remplissage du moteur
- Pour augmenter la quantité d'air admise:
 - Volute d'admission variable
 - Compresseur
 - Turbocompresseur
- Volute d'admission variable:
 - Bénéficier des ondes de compression qui se développent dans les volutes d'admission pour augmenter le remplissage en ajustant la longueur des tuyaux d'admission

Admission variable, Suralimentation et Turbocompresseurs



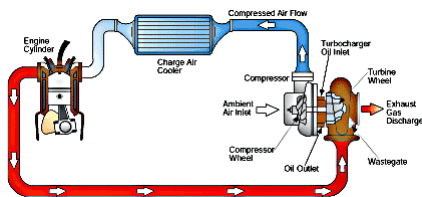
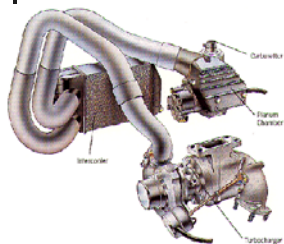
- Compresseur:
 - L'arbre du moteur entraîne un compresseur (types centrifuge, root ou à palette) qui augmente la pression de l'air d'admission même à bas régime
 - Désavantage: puissance soutirée à l'arbre du moteur réduit le rendement global du moteur, augmente la consommation, diminue la consommation.

Admission variable, Suralimentation et TurboCompresseurs



- TurboCompresseur:
 - Turbine mue par les gaz d'échappement et placée sur le même arbre que le compresseur placé l'admission
 - Avantages:
 - Énergie du compresseur récupérée sur les gaz d'échappement donc amélioration du rendement
 - Peut augmenter fortement la puissance du moteur spécialement si on utilise un intercooler entre le compresseur et l'admission
 - Améliore le rendement à cause de la surpression à l'admission: travail positif d'admission
 - Désavantage:
 - Temps de réponse
 - Faible (voire aucune) amélioration à bas régime

Admission variable, Suralimentation et TurboCompresseurs



- Augmentation de la température des gaz d'admission
 - Augmente le risque de cognement (autoallumage)
 - Augmente la formation de NOx
 - Remède: introduction d'un intercooler et d'un échangeur de chaleur
 - Refroidissement augmente le remplissage

Compression des gaz d'admission diminue le rapport de compression et le rendement global par rapport au moteur atmosphérique



Moteurs essence

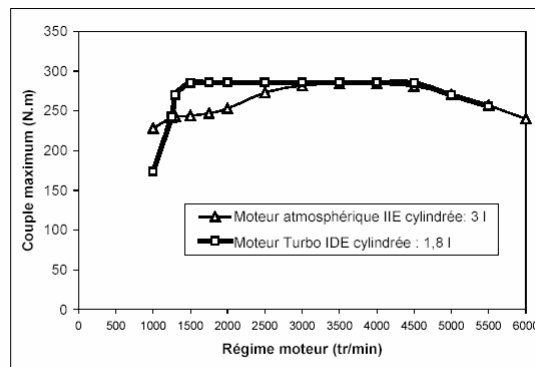


Figure 9 : Exemple de downsizing : avec des performances maximales proches, le moteur de 1,8 l de cylindrée permet, en utilisation urbaine, une réduction de consommation de l'ordre de 21 % par rapport à celui de 3 l

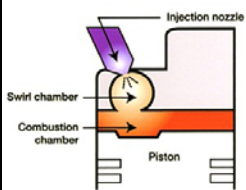


Injection directe et combustion en mélange pauvre

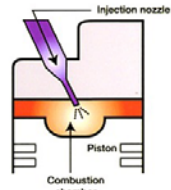
- Les émissions de HC et de CO peuvent être réduites en mélange pauvre, mais les mélanges ultra pauvres posent problème à cause de la difficulté de propagation de la flamme.
- L'injection directe d'essence permet d'envisager d'arriver à un mélange efficace
 - Injection haute pression: réduction de la taille des gouttelettes
 - Injection près de la bougie pour un enrichissement local pour une meilleure ignition
 - Refroidissement de l'air d'admission à cause de l'évaporation: réduction du cognement, augmentation du rapport de compression, augmentation du rendement
 - Augmentation du coût
 - Augmentation des NOx

Injection directe et combustion en mélange pauvre

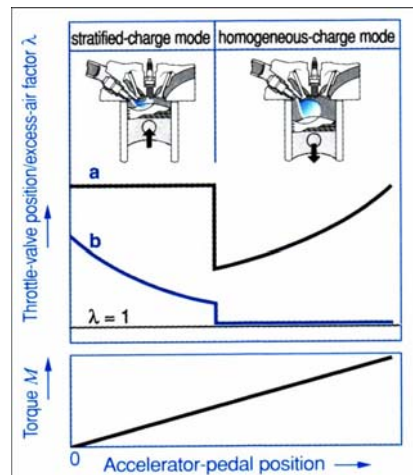
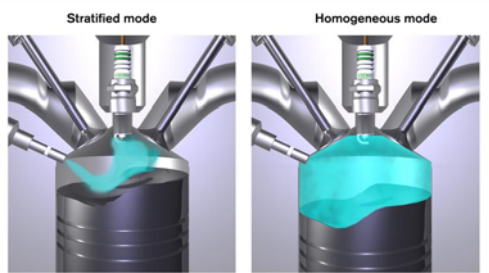
INDIRECT INJECTION



DIRECT INJECTION



Injection directe et combustion en mélange pauvre



Moteurs essence

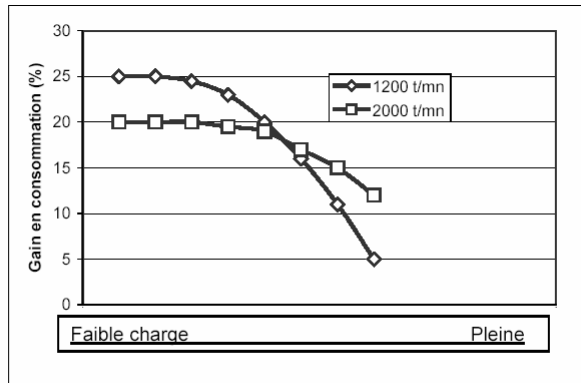
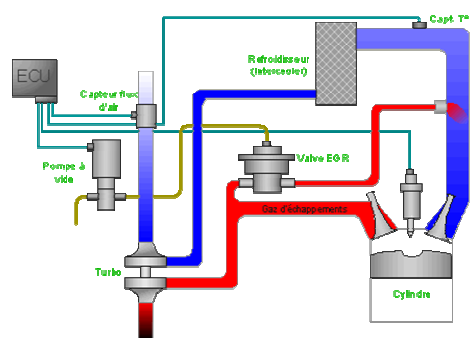


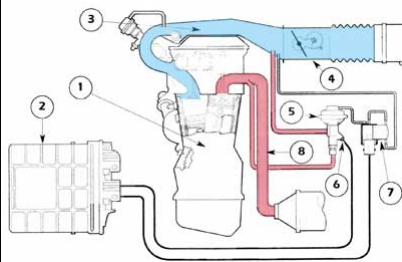
Figure 8 : Gains en consommation par rapport à la technologie conventionnelle (stoéchiométrique) réalisés avec l'injection directe et la combustion stratifiée (cylindre 1.2 l)

Vanne de recirculation des gaz EGR



- La vanne EGR est apparue dans les années 1970 aux États Unis. Testée d'abord par General Motors, pour réduire les émissions d'Oxyde d'azote (NOx) que rejettent les véhicules.
- Pour diminuer les émissions de NOx , il faut réduire la température maximale de combustion. Ceci peut se faire en diluant les gaz admis par le moteur avec un gaz inerte, celui ci en s'intercalant entre le carburant et le comburant, ralentit la vitesse de combustion et absorbe des calories.

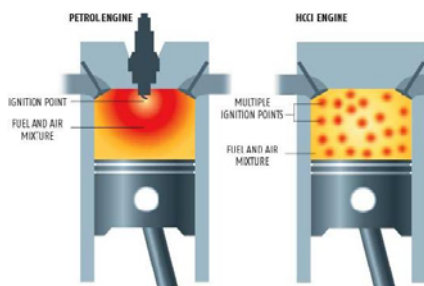
Vanne de recirculation des gaz EGR



1/ Moteur 2/ Calculateur 3/ Collecteur d'admission 4/ Unité de commande de papillon d'accélérateur 5/ Clapet EGR 6/ Sonde température EGR 7/ Électrovanne EGR 8/ Collecteur d'échappement

- Les gaz d'échappement étant constitués de gaz inertes, il s'agit de faire recirculer une partie de ces gaz dans le collecteur d'admission.
- Le calculateur gère le pilotage de l'EGR par l'intermédiaire d'une électrovanne ou d'un moteur électrique en fonction de plusieurs paramètres (température eau, air, information ralenti pleine charge....)

Diesel HCCI



- La combustion homogène HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) consiste à la fois à réduire la consommation et à réduire les polluants, notamment les NOx (réduction de 100 à 1!).
- Le défi consiste à contrôler le temps d'auto-allumage, la vitesse et la température pour optimiser le mélange et la combustion. Elle conduira à une évolution de la formulation des gazoles. Elle pourrait aboutir vers 2010.



Essence CAI

- La combustion de type CAI (Controlled Auto Ignition) a pour objectif d'allumer le mélange par auto inflammation et non plus grâce à une bougie.
- Elle est provoquée par la rétention dans le cylindre de gaz chauds issus de la combustion lors du cycle précédent. Il permet de mieux maîtriser la combustion et de la rendre plus homogène
- Ce mode de combustion pourrait être combiné selon les phases du moteur avec des combustions classiques.



Moteurs diesel

- Rendement du moteur diesel à injection directe a un rendement 30% supérieur à celui du moteur à essence
- Potentiel important de **downsizing**: moteur de 1.2 à 1.5l dotés de performances spécifiques élevées: couple spécifique de 150 Nm/l et puissance spécifique de 50 kW/l)
- Réduction de 5 à 10% avec l'injection directe haute pression et la turbo suralimentation à géométrie variable
- Le VERITABLE ENJEU pour le diesel, c'est la capacité à **respecter les futures normes d'émission de polluants**
 - Catalyse à 3 voies impossibles à cause de l'excès d'air
 - Traitement des NOx impossible par l'optimisation de la combustion
 - Post traitement des particules matérielles



Moteurs diesel

| g/km MVEG | | EURO III | EURO IV |
|--------------|--------|----------|---------|
| | | 2000 | 2005 |
| Essence | CO | 2,3 | 1 |
| | HC | 0,2 | 0,1 |
| | NOx | 0,15 | 0,08 |
| Diesel | CO | 0,64 | 0,5 |
| | NOx | 0,5 | 0,25 |
| | HC+NOx | 0,56 | 0,3 |
| | PM | 0,05 | 0,025 |

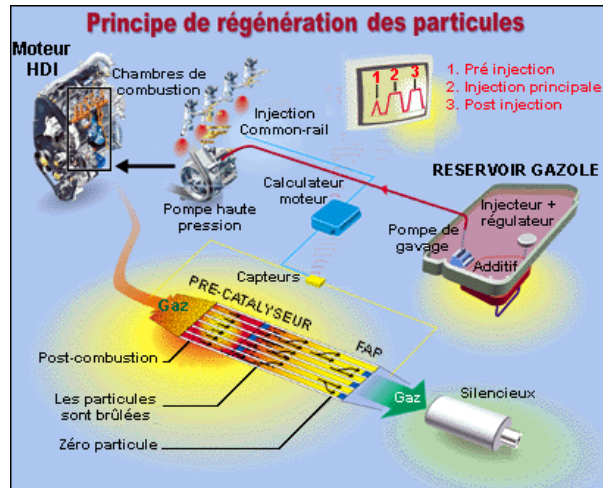
Tableau 1 - Normes antipollution des automobiles européennes



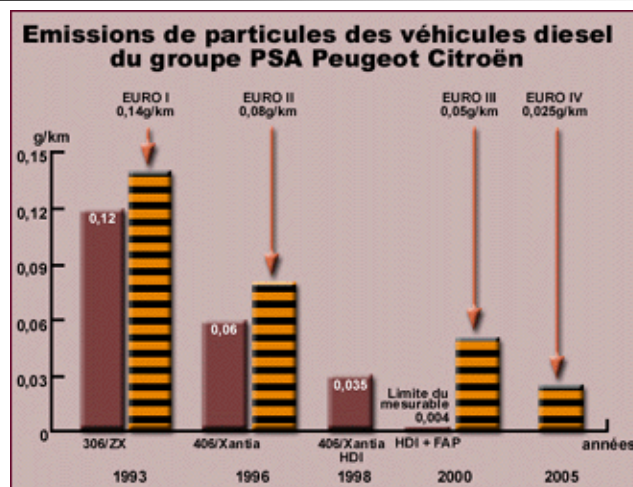
Améliorations des moteurs diesel

- Voies d'amélioration:
 - Systèmes d'injection:
 - nombre d'injections par cycle: 5 à 7
 - Optimisation chambre de combustion
 - Systèmes de post-traitement
 - réduction des NOx par réduction catalytique sélective ou pièges à NOx
 - filtre à particules
 - filtre à régénération continue
 - catalyse 4 voies
 - Nouveaux procédés de combustion
 - homogénéisation du mélange plus grande

Moteurs diesel



Moteurs diesel





Les autres carburants



Moteurs dédiés au gaz naturel

- Le gaz naturel est un bon candidat pour diminuer les émissions de CO₂
 - grandes réserves gaz naturel
 - émissions faibles (faible rapport de carbone)
 - indice d'octane élevé (130)
 - downsizing possible
- Le rendement du moteur pourrait réduire les émissions de CO₂ de 5 à 10% par rapport au moteur diesel
- Son utilisation dans un véhicule hybride serait encore plus avantageuse
- La communauté européenne souhaite une substitution progressive des carburants traditionnels par du gaz naturels: 2% en 2010, 5% en 2015 et 10% en 2020



Moteur à CI + hydrogène ou gaz naturel

- Conversion assez peu onéreuse des moteurs à piston
- Questions principales
 - Réseau de distribution de l'hydrogène
 - Temps de remplissage
 - Stockage du H₂ à bord
 - Compressé @ 800 bars
 - Liquéfié @ -253°C
 - Adsorption (nanotubes de carbone...)
 - Production H₂ à bord?
- ⇒ Réduction de l'autonomie!
- ⇒ Bilan énergétique global?



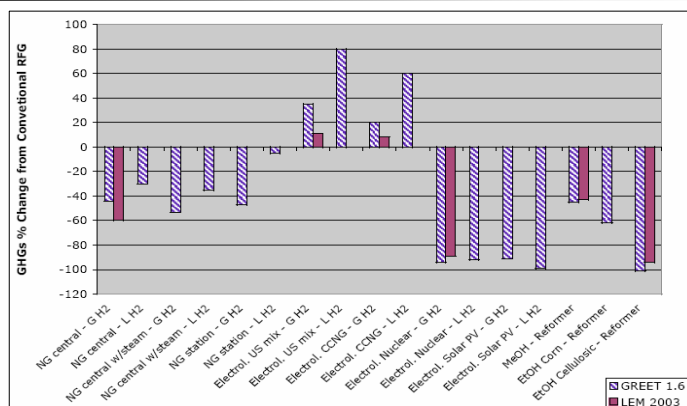
Hydrogen-powered MINI concept



Bus roulant au gaz naturel



Moteur à CI + hydrogène ou gaz naturel



Les gains au niveau des émissions de CO₂ par rapport à un moteur essence équivalent aux USA