

# Introduction à la motorisation automobile

---

09/06/2020

Fabrice Le Berr ([fabrice.le-berr@ifpen.fr](mailto:fabrice.le-berr@ifpen.fr))



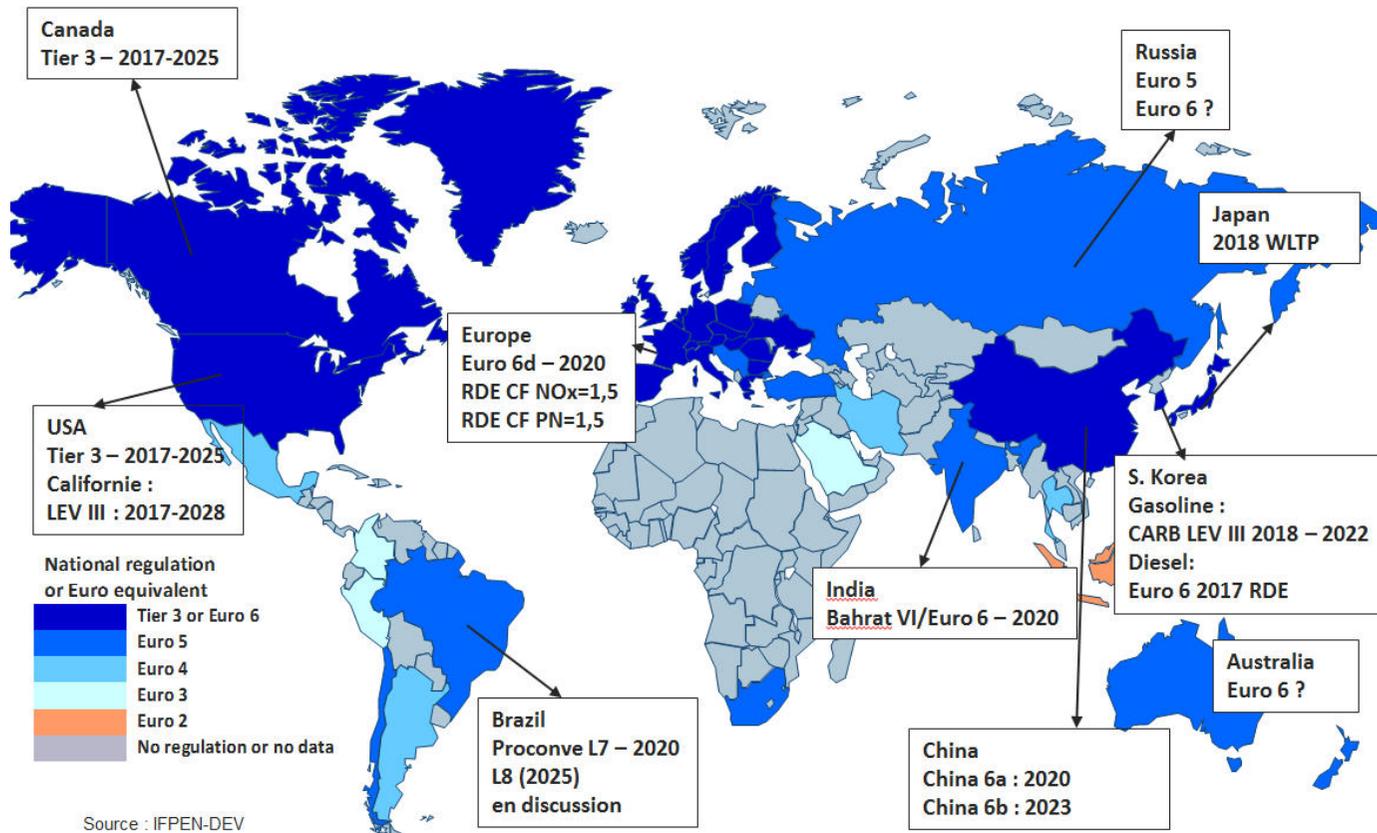
- **Contexte et évolutions réglementaires**
- **Principes et grandeurs fondamentales de la combustion**
- **Le moteur à allumage commandé : fonctionnement et évolutions**
- **Le moteur Diesel : fonctionnement et évolutions**
- **Conclusions et perspectives**

# NORMES D'ÉMISSIONS DES VÉHICULES LÉGERS

.....  
EUROPE



## Normes d'émissions – Véhicules Particuliers



# EUROPE – ÉMISSIONS DE POLLUANTS VÉHICULES PARTICULIERS

	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6b	Euro 6d TEMP
Dates Application*	1992	1996	2000	2005	2009	2011	2014	2017
Cycle	ECE	ECE	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	WLTC

## VP Essence

CO	g/km	2,72	2,2	2,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
HC	g/km			0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
HC+NOx	g/km	0,97	0,50						
NOx	g/km			0,15	0,080	0,060	0,060	0,060	0,060
NMHC	g/km					0,068	0,068	0,068	0,068
PM	g/km					0,005	0,0045	0,0045	0,0045
PN	#/km							6.10 <sup>12</sup>	6.10 <sup>11</sup>

## VP Diesel

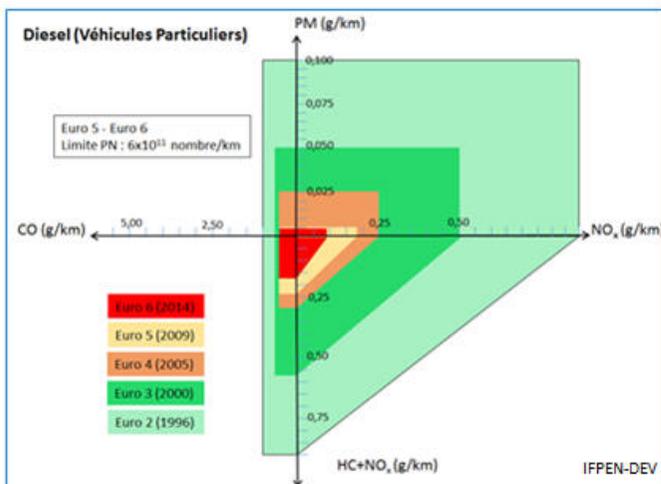
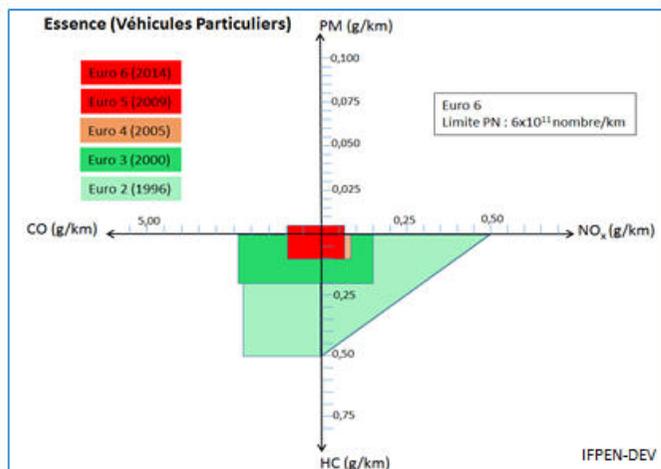
CO	g/km	2,72	1,0	0,64	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
HC+NOx	g/km	0,97	0,90	0,56	0,30	0,23	0,23	0,17	0,17
NOx	g/km			0,50	0,25	0,18	0,18	0,080	0,080
PM	g/km	0,14	0,100	0,050	0,025	0,005	0,0045	0,0045	0,0045
PN	#/km							6.10 <sup>11</sup>	6.10 <sup>11</sup>

## Normes Euro pour Véhicules Particuliers (VP)

- Masse de référence < 2 610 kg
- Véhicules de catégorie M (transport de passagers)
- Euro 5 introduit des limites de particules PM pour les véhicules essence à injection directe, identiques à celles des véhicules diesel
- Euro 6b introduit des limites de particules en nombre PN pour les véhicules essence à injection directe
- **Septembre 2017 : Euro 6d-TEMP**
  - Réglementation RDE : Real Driving Emissions, introduisant des facteurs de conformité temporaires pour NOx et PN
  - Nouveau cycle harmonisé WLTC (GTR-15), en remplacement de NEDC (phase de transition)
- **Janvier 2020 : Euro 6d**
  - Réglementation RDE : facteurs de conformité pour NOx et PN
  - Nouveau cycle harmonisé WLTC

# NORMES d'émissions - VÉHICULES PARTICULIERS

## Evolution des normes Euro



## Normes d'émissions Euro 6

Euro 6 Limites Emissions (Essai type 1)	Unité	Essence	Diesel
CO	g/km	1,0	0,5
THC	g/km	0,1	
HC + NO <sub>x</sub>	g/km		0,17
NO <sub>x</sub>	g/km	0,060	0,080
NMHC	g/km	0,068	
PM	g/km	0,0045	0,0045
PN*	nombre /km	$6.10^{11}$	0,0045

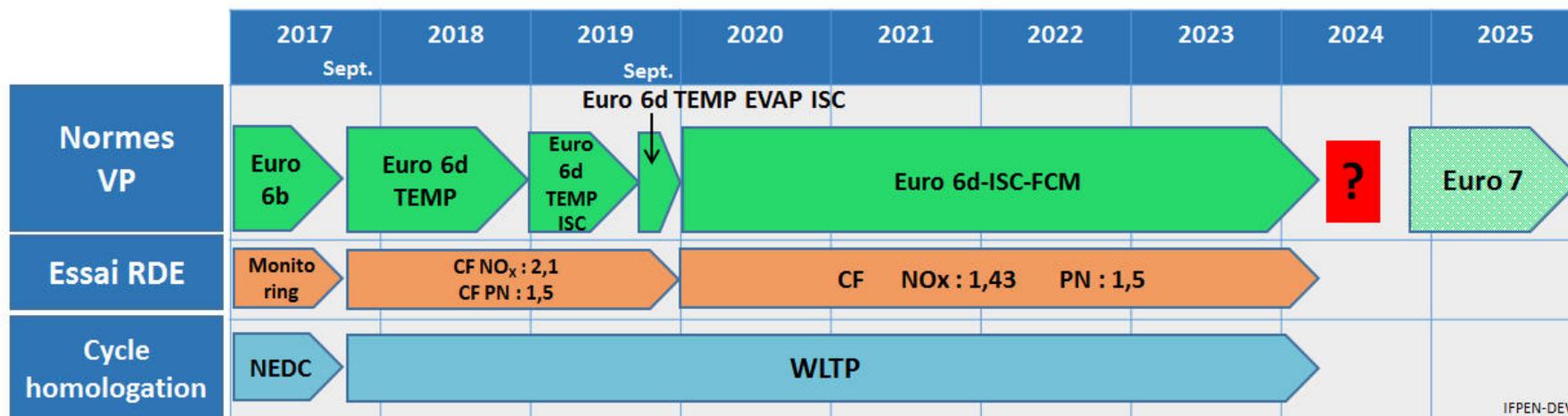
\*PN pour essence : moteurs à injection directe

➤ **Actuellement : Norme Euro 6d-ISC-FCM (1<sup>er</sup> janvier 2020) WLTP - RDE**

➤ Euro 6 s'applique depuis le 1<sup>er</sup> sept 2014

➤ Valeurs Euro 6 définies dans [Règlement \(CE\) 2007/715](#)

# EURO 6 - LES DIFFÉRENTES ÉTAPES



Dates pour les nouveaux modèles de véhicules

## Euro 6d-TEMP a évolué vers

**Euro 6d-TEMP-ISC** : à partir du 01.01.2019

**Euro 6d-TEMP-ISC-EVAP** : à partir du 01.09.2019

⇒ Test de conformité en service **ISC (In-Service Conformity)**, avec ajout de mesures en conditions de conduite RDE

⇒ Ajout du test d'évaporation **EVAP**

## Euro 6d a évolué vers Euro 6d-ISC-FCM

⇒ **FCM** : OBFCM : dispositif embarqué pour le contrôle de la consommation de carburant et/ou d'énergie électrique

## ÉMISSIONS DE POLLUANTS – Essai RDE

- Les émissions de polluants sont mesurées grâce à un équipement spécifique installé sur le véhicule (PEMS)
- Euro 6 : NOx et PN réglementés dans l'essai RDE
- **Introduction des facteurs de conformité CF et NTE**
  - CF liés à incertitude des mesures par le PEMS
  - Valeurs limites NTE (Not To Exceed)
  - $NTE = CF \times \text{limite Euro 6}$
  - ⇒ **Objectif : être proche de CF=1**
- Caractéristiques de l'essai RDE sur route
  - Réalisé sur 3 portions de route : urbaine, extra-urbaine, autoroute
  - Conditions atmosphériques et de trajet : modérées ou étendues
  - Dynamique de conduite
  - Démarrage à froid pris en compte dans la partie urbaine et dans le trajet total



### CF pour NOx

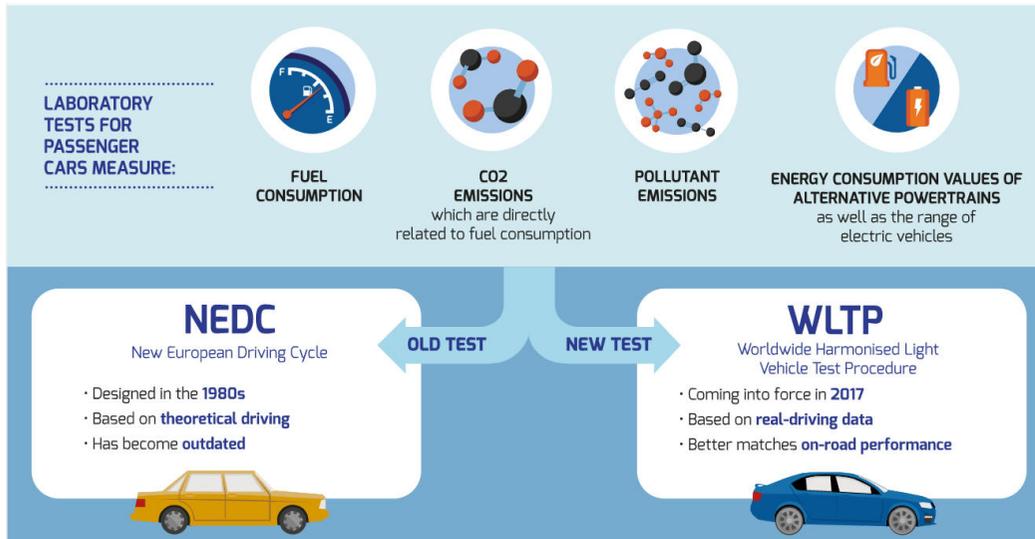
- 2,1 (sept 2017 pour NM et sept 2019 pour TI)
- 1,43 (janv 2020 pour NM et janv 2021 pour TI)

### CF pour PN

- 1,5 à partir de septembre 2017

NM : nouveaux modèles de véhicules  
 TI : toutes immatriculations véhicules neufs

# CYCLE HARMONISÉ WLTC



Enjeux du nouveau cycle d'homologation des véhicules WLTC (Worldwide Light Duty Test Cycle) ou WLTP (Worldwide Light Duty Procedure)

- Harmonisation au niveau mondial
- Donner des valeurs de consommation des véhicules, d'émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants plus proches de la réalité

- WLTC : en remplacement du cycle NEDC
  - Europe, Chine, Japon, Inde : introduction progressive du cycle WLTP
  - Application WLTP en Sept. 2017 pour les nouveaux modèles de véhicules particuliers et en Sept. 2018 pour les nouvelles immatriculations
  - Température : 23 °C + Essai ATCT à 14°C
  - Véhicules utilitaires légers (VUL) : application décalée d'un an
  - Au 1er janvier 2019, seules les valeurs WLTP sont communiquées au consommateur
- Concept de famille d'interpolation : basé sur la détermination des émissions de CO<sub>2</sub>
  - ⇒ seuls le véhicule H (le plus consommateur d'énergie) et le véhicule L (le moins consommateur) d'une famille sont testés

# EURO 7

	Euro 6d		Euro 7 ?
	Essence	Diesel	Fuel neutral
Dates	Janvier 2020		2025 ?
Cycles	WLTC + RDE		WLTC + RDE
Température	-7°C, 14°C et 23°C		-7°C, 14°C et 23°C
THC (mg/km)	100	170 (HC+NOx)	50 (China 6b :35; 2023)
NMHC (mg/km)	68		35 (China 6b : 35)
CO (mg/km)	1000	500	500
NOx (mg/km)	60	80	35-50 (China 6b : 35)
PM (mg/km)	4,5	4,5	3 - 4 (US Tier 3 : 1,9; 2025)
PN (#/km)	6.10 <sup>11</sup> (>23 nm)	6.10 <sup>11</sup> (>23 nm)	6.10 <sup>11</sup> (>10 nm)
Polluants à -7°C	CO, THC		Fuel neutral CO, THC, CO <sub>2</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , PN
Polluants additionnels			Aldéhydes, NH <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , Ethanol N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>
Essai RDE	CF pour NOx et PN		CF = 1 CF pour autres polluants



## Normes Euro 7

- Fuel neutral : la même limite s'appliquera aux motorisations essence ou diesel
- Mesure des particules à partir de 10 nm
- Polluants additionnels : Aldéhydes (formaldéhyde, acétaldéhyde), NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>...
- Polluants à effet de serre intégrés comme polluants additionnels : N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>
- Essai RDE :
  - Facteurs de conformité pour des polluants autres que NOx et PN
  - Facteurs de conformité CF=1

Sources :

- ICCT, [recommendations for post-Euro 6 standards](#), oct. 2019
- AVL Powertrain Eng. Techday, W. Hofegger, Oct. 2017
- Piotr Bielaczy, [Emission Control Science and Technology, Vol 5, Issue 1, p. 86, 2019](#)
- ICCT, Dornoff J., [The long way to clean air, Stakeholder event, 24/10/2018](#)
- AECC Newsletter, Juin 2019

# ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

SUSTAINABLE MOBILITY



- Objectifs d'émissions moyennes de CO<sub>2</sub>
  - VP : 95 g/km en 2021 (avec 95% de la flotte en 2020) (NEDC)
  - VUL : 147 g/km en 2020
- Depuis le 1er septembre 2017 : les émissions de CO<sub>2</sub> sont mesurées suivant WLTP + Test ATCT
- Période de transition (2017-2020) : elles sont converties suivant NEDC (valeurs NEDC corrélées) jusqu'en 2020 compris pour comparaison avec les objectifs définis suivant NEDC
  - ⇒ Outil simulation CO2MPAS (Règlement 2017/1153)
- A partir de 2021 : d'après la méthode de corrélation et la performance de la flotte en 2020, les objectifs spécifiques des constructeurs seront définis suivant WLTP

## Objectifs de réduction VP

2025 : -15 % / 2021  
2030 : -37,5 % / 2021

## Objectifs de réduction VUL

2025 : -15 % / 2021  
2030 : -31 % / 2021

Sources : [Règlement \(UE\) 2019/631](#) et [Règlement \(UE\) 2017/1153](#)

# ÉMISSIONS DE CO<sub>2</sub>

## A partir de 2020

### Super-crédits

- Coefficients multiplicateurs pour les véhicules émettant moins de 50g CO<sub>2</sub>/km
- Pour l'objectif de 95 g CO<sub>2</sub>/km, coefficient
  - 2020 : égal à 2 véhicules
  - 2021 : égal 1,67 véhicules
  - 2022 : égal à 1,33 véhicules
  - 2023 : égal à 1
- Limite de réduction de CO<sub>2</sub> : 7,5 g CO<sub>2</sub>/km par constructeur

### Eco-innovations

- Technologies innovantes nouvelles sur le marché
- La contribution totale de ces technologies à la réduction de l'objectif d'émissions spécifiques d'un constructeur peut atteindre un maximum de 7 g de CO<sub>2</sub>/km

Liste complète des Eco-innovations approuvées sur [Europa](#)

### Pénalités

95 €/g et par véhicules dépassant l'objectif

## A partir de 2025 : bonification pour introduction de véhicules ZLEV

- Bonification pour le constructeur si la part de véhicules ZLEV dans ses ventes dépasse un niveau minimum en 2025 et 2030

Véhicule ZLEV : CO<sub>2</sub> émissions < 50 g / km

### ➤ 2025-2029 :

VP, VUL : niveau minimum : 15% des ventes

### ➤ A partir de 2030 :

VP : niveau minimum ZLEV : 35%

VUL : niveau minimum ZLEV : 30%

- La bonification peut aller jusqu'à 5%. Ce maximum est atteint lorsque la part de ZLEV dans les ventes du constructeur est à 20%.

Objectif d'émissions spécifiques = objectif d'émissions spécifiques de référence x facteur ZLEV

Ex : VP : Facteur ZLEV =  $(1 + y - x)$  pour  $1,0 < \text{facteur ZLEV} < 1,05$

X : 15% ou 35% ; Y : part de ZLEV dans le parc de VP neufs du constructeur

# PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DES MOTEURS A COMBUSTION

---

## Principes et grandeurs fondamentales



## Les différents types de machines : définitions

### ● Machines à combustion externe / interne

- Externe : flamme et gaz chauds ne sont pas en contact avec la pièce motrice
  - Utilisation d'un fluide intermédiaire (air, vapeur d'eau)
  - Exemples : machine à vapeur, moteur Stirling, ...
- Interne : flamme et gaz chauds sont en contact avec la pièce motrice
  - Machines courantes (rendement généralement élevé)

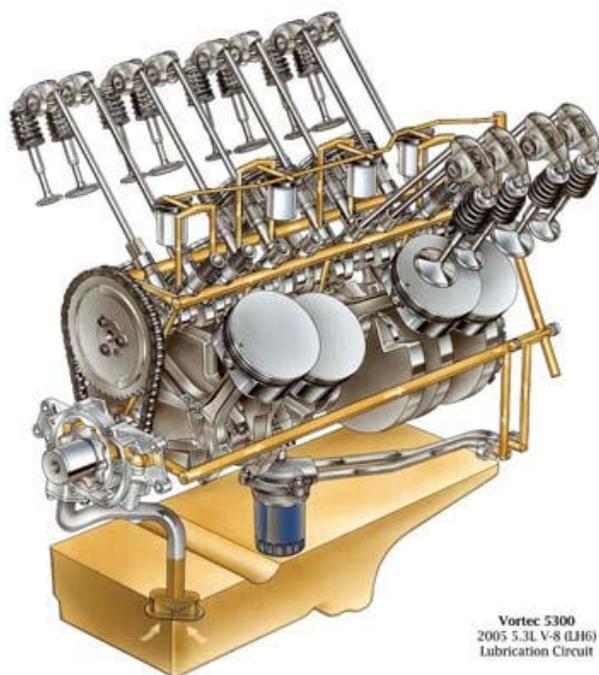
### ● Machines à écoulement continu / discontinu

- Ecoulement continu : Turbomachines, turboréacteurs
  - Applications généralement dédiées au monde aéronautique
  - Grande fiabilité (peu de pièces en mouvements), très bon rapport puissance / poids mais rendement limité (25%)
- Ecoulement discontinu : moteurs alternatifs à 4 temps / 2 temps
  - Application aux véhicules légers (VL) et véhicules poids lourds (PL)
  - Beaucoup de pièces en mouvement (système complexe), bon rendement (environ > 40%) mais rapport puissance / poids modéré
  - 2 catégories : moteurs à allumage commandé et moteur à allumage par compression (Diesel)

## Les 2 catégories de moteur à combustion interne

- Moteur à allumage commandé (par étincelle)
  - Fonctionnent à l'essence, l'éthanol, au gaz naturel...
  - Initialisation de la combustion par apport d'énergie extérieur (bougie)
  
- Moteur à allumage par compression (Diesel)
  - Fonctionnent au gazole, substituts du gazole (EMHV)
  - Initialisation de la combustion par auto-inflammation du carburant (lors de la compression)

# Eclatés de moteurs à pistons



## Différentes pièces du moteur à combustion



*Piston pour moteur essence*



*Pistons pour moteur Diesel*



*Assemblage bielle - piston*



*Vilebrequin de V6*



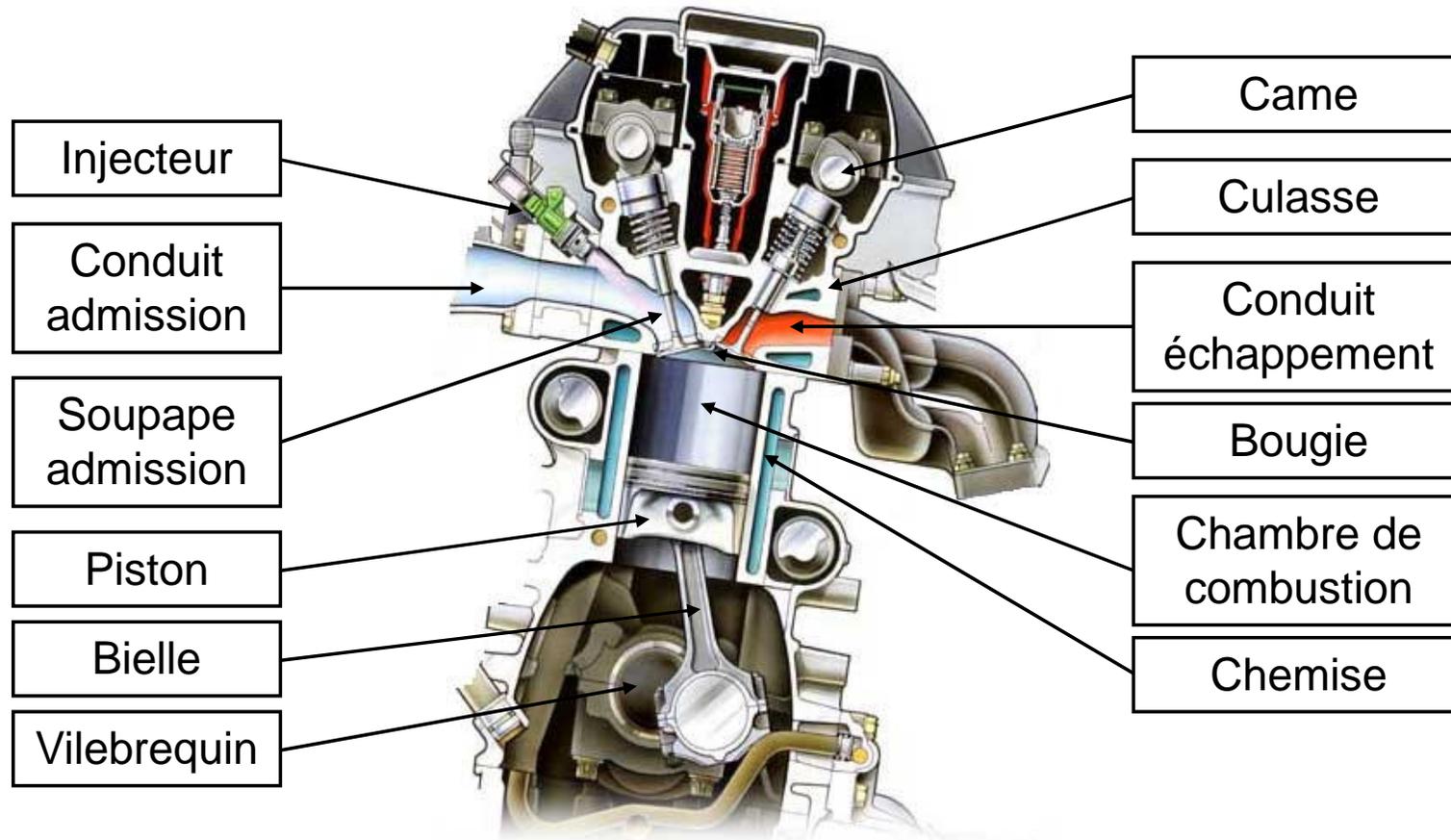
*Bloc moteur d'un moteur L4*



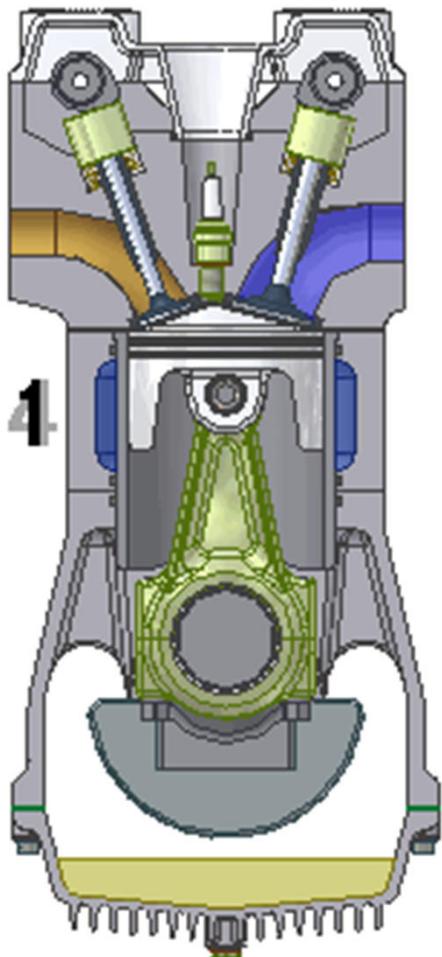
*Culasse 4 soupapes / cylindre*

## La chambre de combustion

SUSTAINABLE MOBILITY



## Le cycle 4 temps



**1 Admission**

**2 Compression**

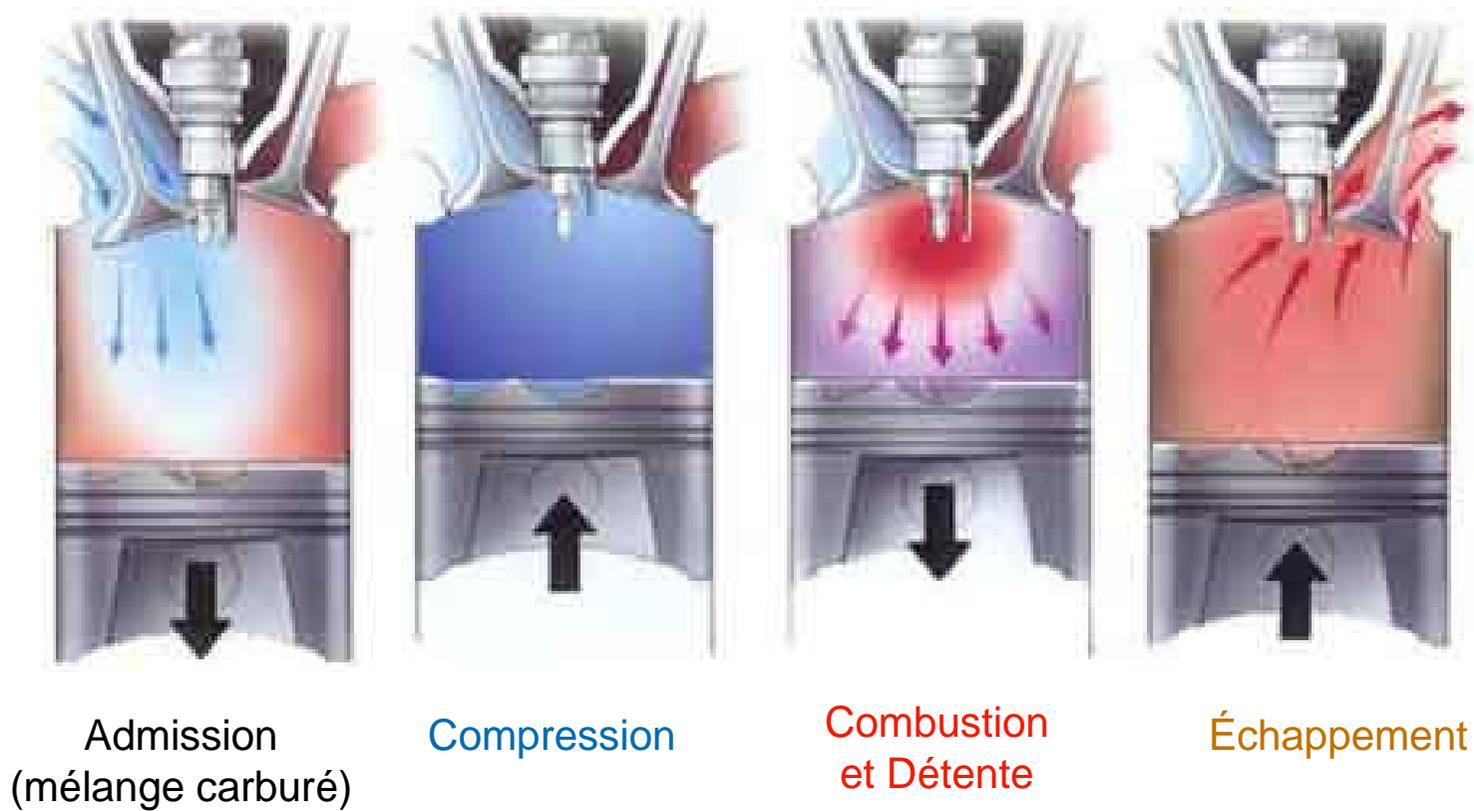
**3 Combustion - Détente**

**4 Échappement**

1 temps moteur =  $180^\circ$  vilebrequin (1 course du piston de bas en haut ou de haut en bas)

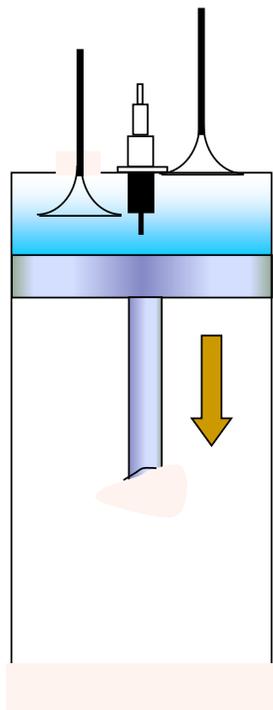
## Le cycle 4 temps : spécificité du moteur allumage commandé

SUSTAINABLE MOBILITY

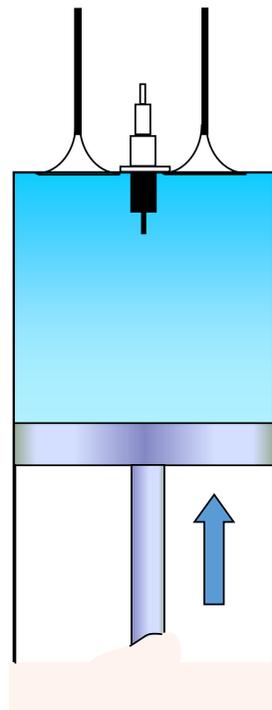


## Le cycle 4 temps : spécificité du moteur allumage commandé

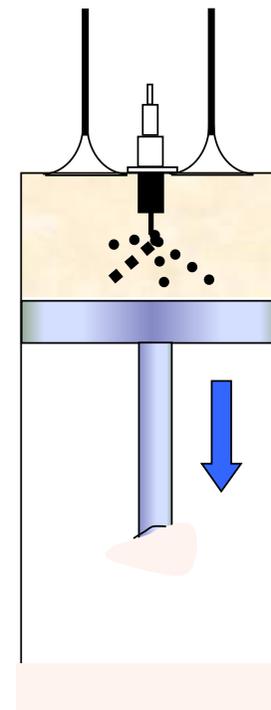
SUSTAINABLE MOBILITY



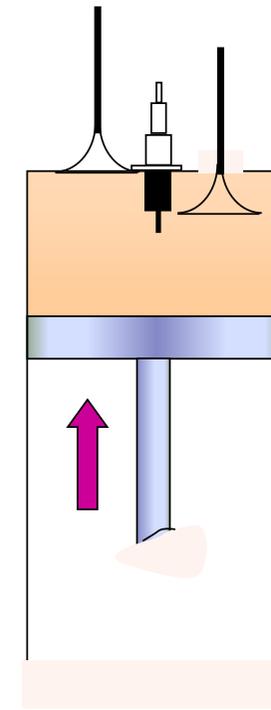
Admission



Compression

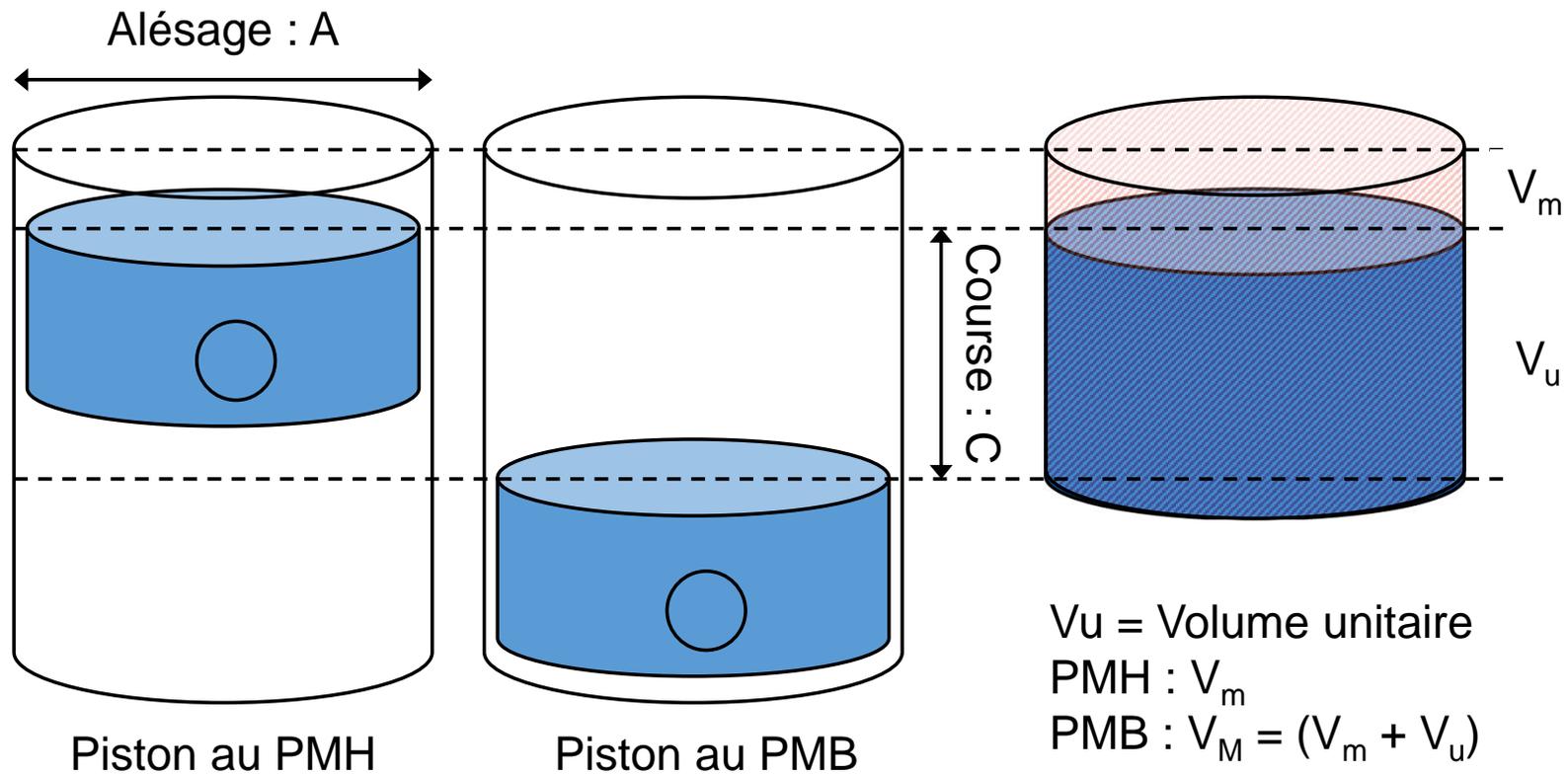


Injection, combustion  
et détente



Échappement

## Dimensions caractéristiques d'un moteur



## Dimensions caractéristiques d'un moteur

● La cylindrée unitaire  $V_u$  
$$V_u = \frac{\pi \times A^2}{4} \times C$$

● Généralement entre 250 et 500 cm<sup>3</sup> (pour un VL)

● La cylindrée totale  $V_{cyl}$  
$$V_{cyl} = n_{cylindre} \times V_u$$

● Le rapport volumétrique de compression  $\varepsilon$

● Entre 8 et 12 pour moteur allumage commandé

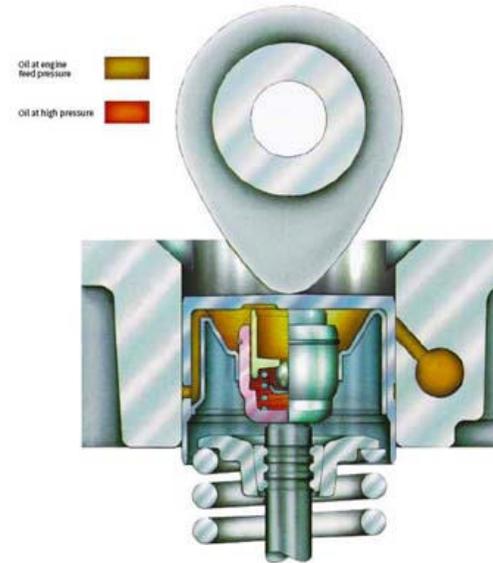
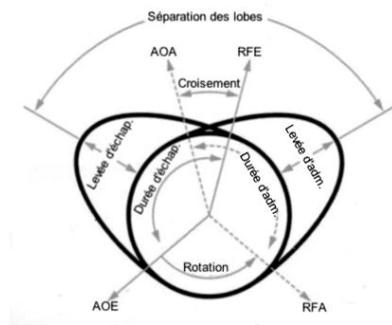
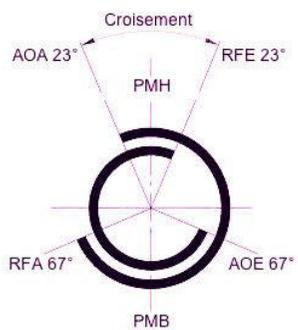
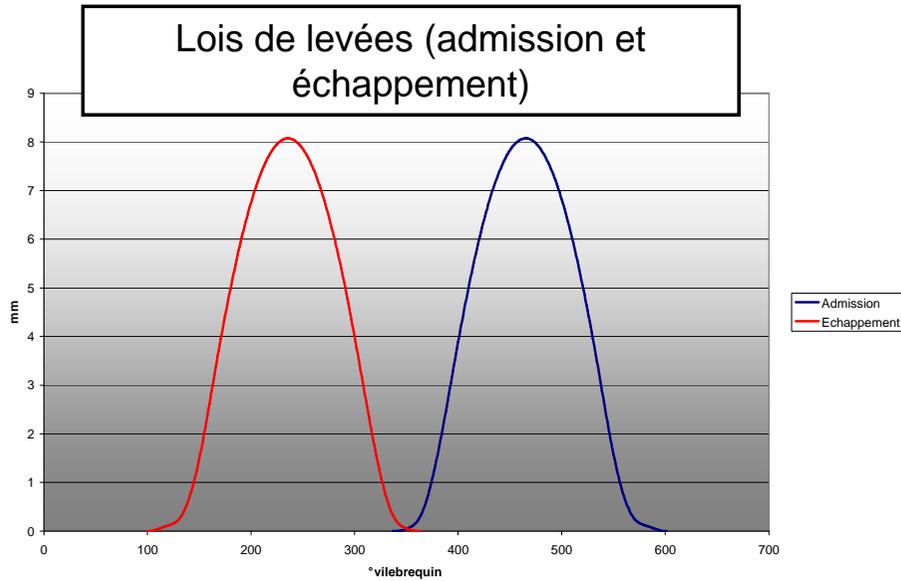
● Entre 14 et 18 pour moteur Diesel

$$\varepsilon = \frac{V_M}{V_m} = \frac{V_u + V_m}{V_m}$$

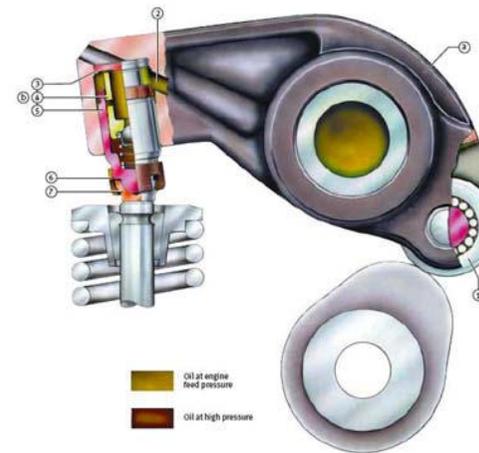
## La distribution sur un moteur 4 temps

- Le système de distribution sert à
  - Admettre la bonne quantité de mélange
    - Dans des conditions contrôlées d'homogénéisation et de mouvements
    - En assurant une proportion adéquate entre air frais, carburant et gaz brûlés résiduels (provenant de la combustion précédente)
  - Expulser les gaz brûlés après la combustion
- Croisement de soupapes
  - Zone généralement autour du PMH où les soupapes admission sont ouvertes en même temps que les soupapes échappement
  - Permet de créer des transferts de gaz
    - Échappement vers Admission → Augmenter la quantité de gaz brûlés résiduels (GBR) dans la chambre
    - Admission vers échappement → Bien vidanger le cylindre (diminuer les GBR) et transfert de gaz frais dans l'échappement
- Toutes les caractéristiques de la distribution (ouvertures, fermetures, lois de levée, levée max...) peuvent être optimisées (distribution variable) pour
  - Contrôler le remplissage en air : pour augmenter les performances et réduire la consommation
  - Contrôler la stabilité du moteur (phase de ralenti)
  - Limiter la production de polluants
  - Limiter les combustions anormales (cliquetis)
  - Optimiser les démarrages à froid

# La distribution sur un moteur 4 temps



Distribution à attaque directe (poussoir)

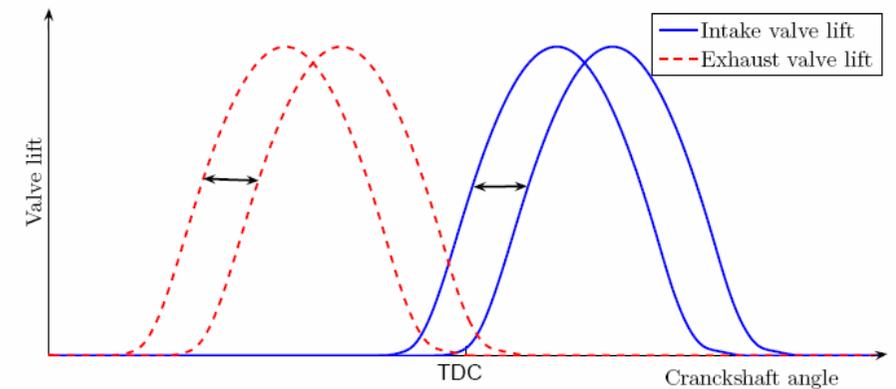
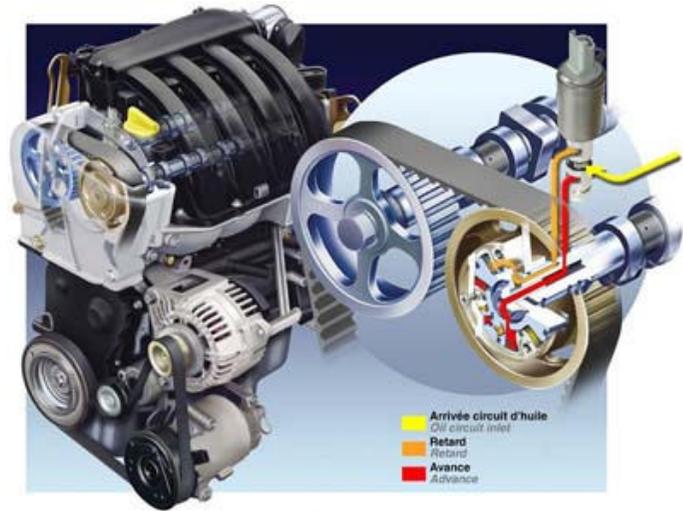
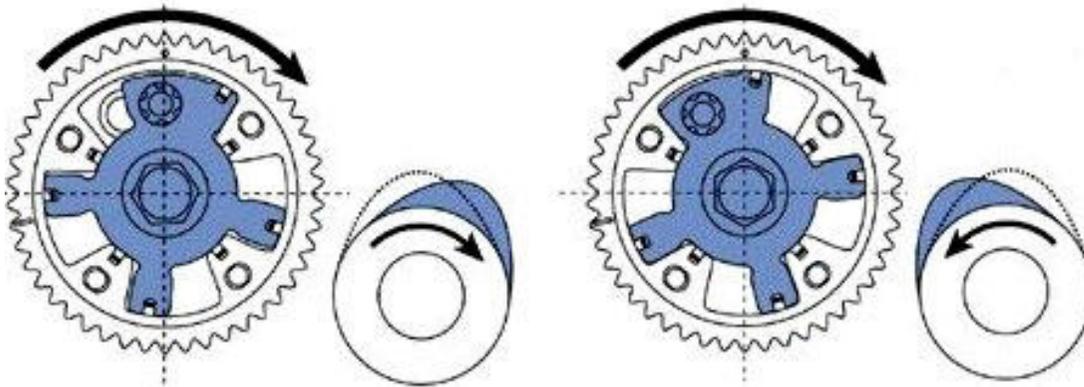


Distribution à linguets

25 Diagramme de distribution (calage dans le cycle)

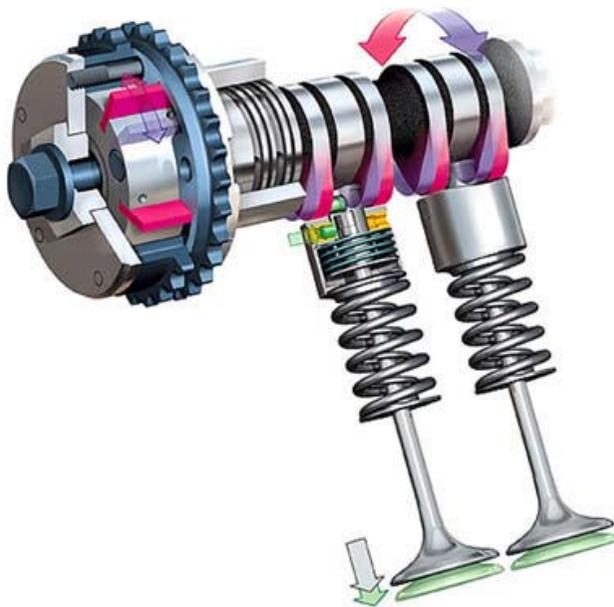
## La distribution variable

- Déphasage de l'arbre à cames
  - Forme de levée fixée
  - Calages variables des ouvertures et fermetures

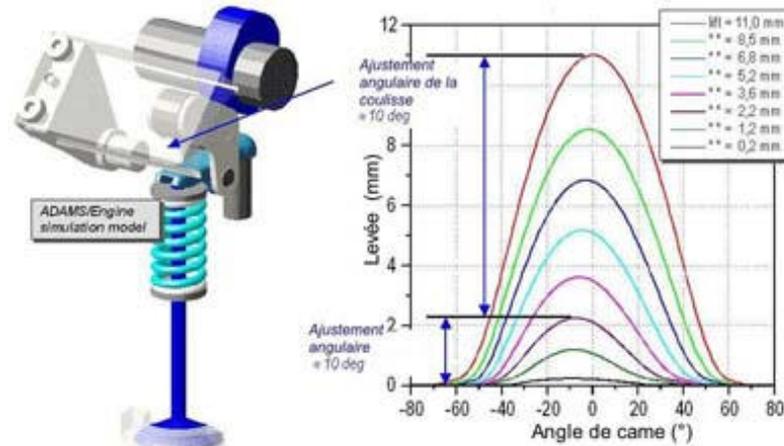


## La distribution variable

### ● La levée variable



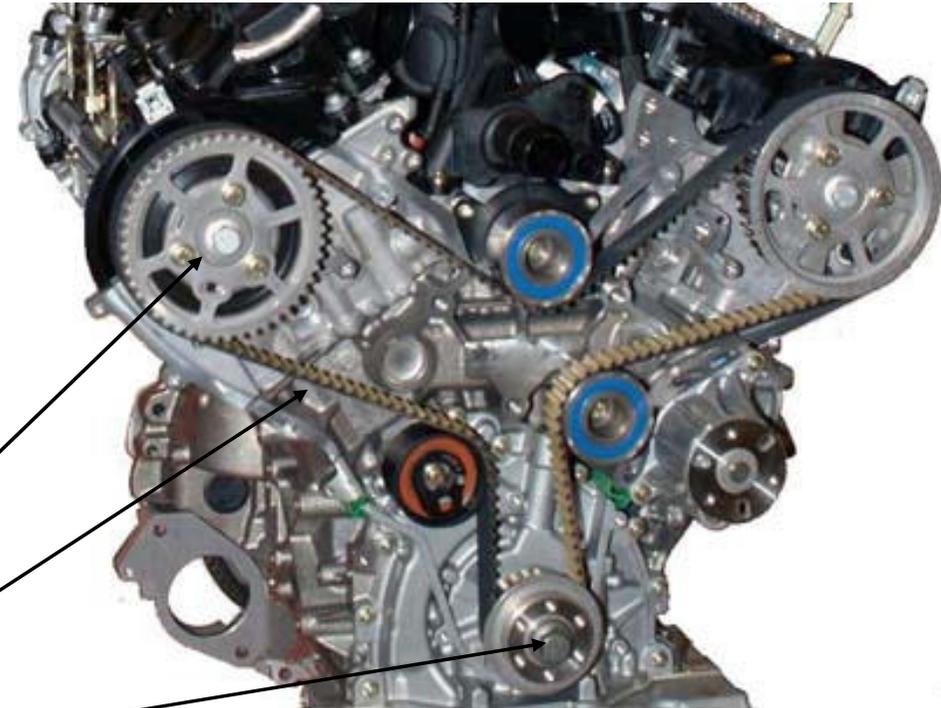
Double came  
(actionneur discret on / off)



Mécanisme entre came et soupape  
(actionneur continu)

## Entraînement de la distribution

- L'arbre à cames tourne 2 fois moins vite que le vilebrequin
  - 1 cycle moteur = 2 tours vilebrequin
  - Entraînement par courroies, chaînes ou pignons



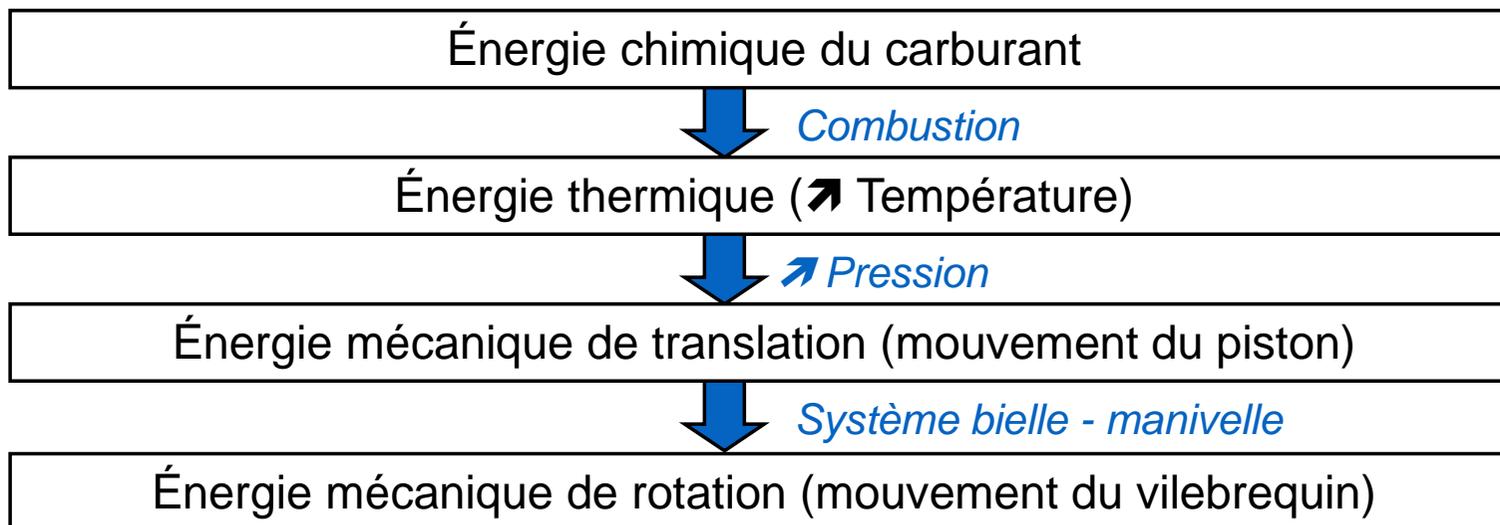
Arbre à cames

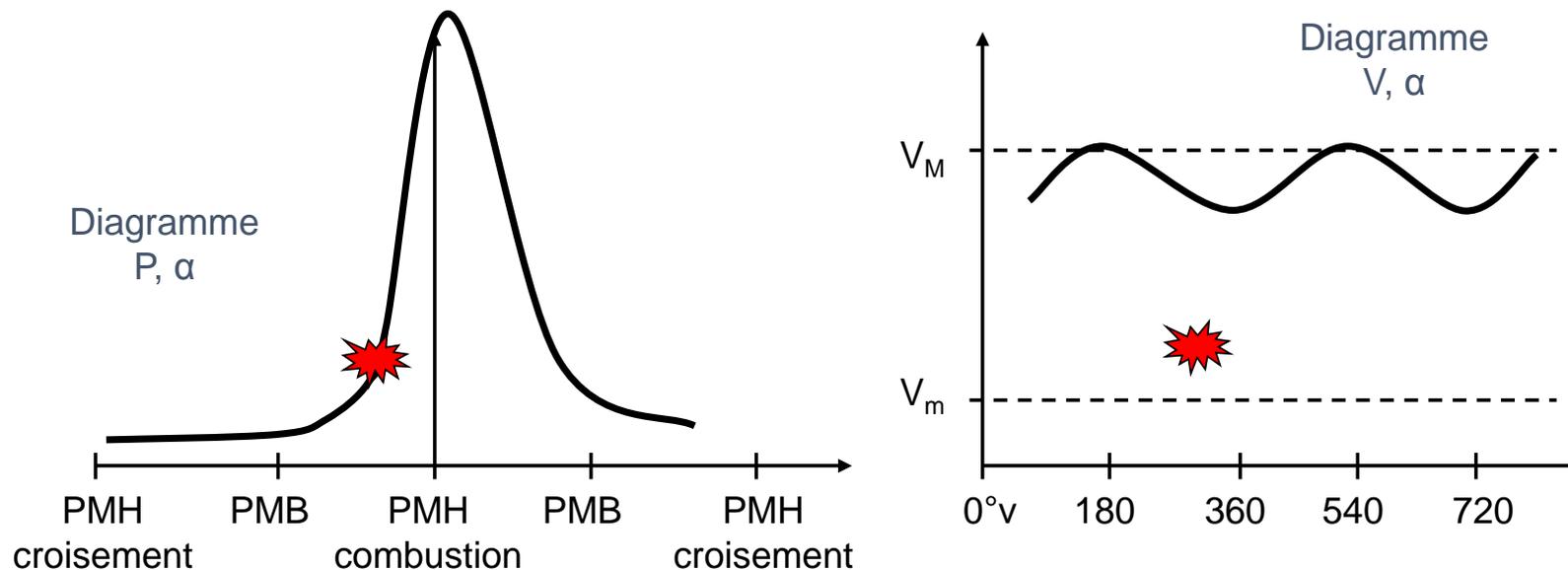
Courroie de distribution

Vilebrequin

## Le rôle du moteur à combustion interne

- Le moteur est un convertisseur d'énergie :
  - Énergie chimique du carburant → Énergie mécanique de rotation
  - Plusieurs conversions sont nécessaires





L'augmentation de la pression cylindre combinée au mouvement alternatif du piston va permettre de récupérer du travail sur le piston, puis sur le vilebrequin.

## Notions de travail et diagramme PV

- Le travail  $W$  est homogène à :

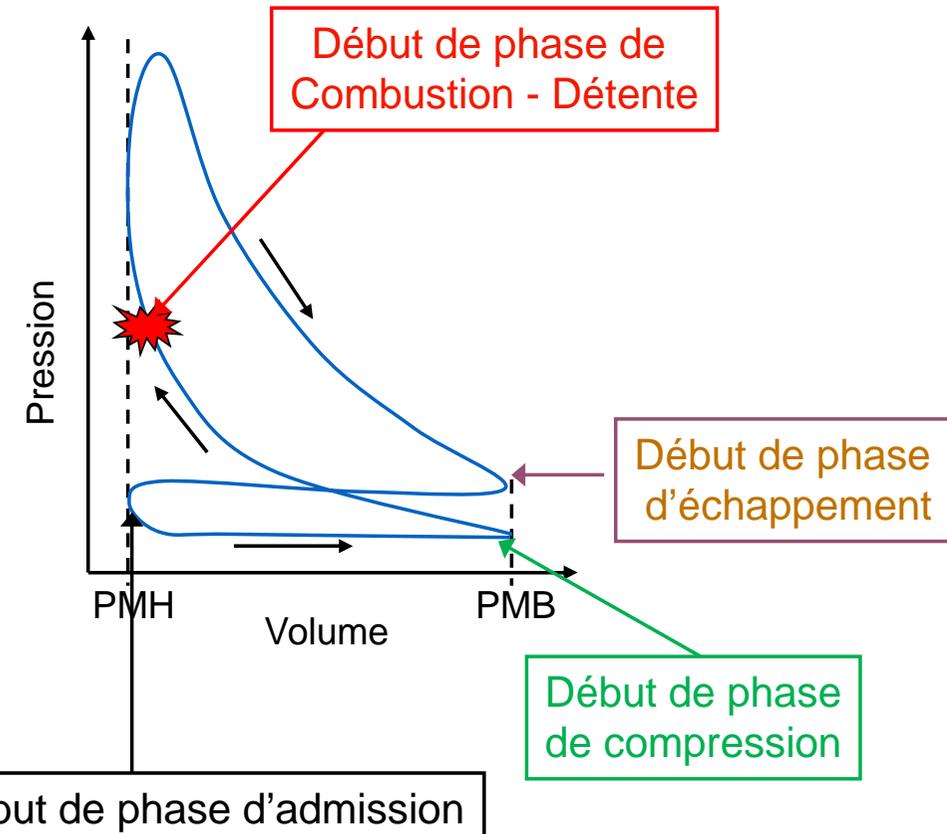
$$\text{Travail (J)} = \text{Pression (Pa)} \times \text{Volume (m}^3\text{)}$$

- Explications :

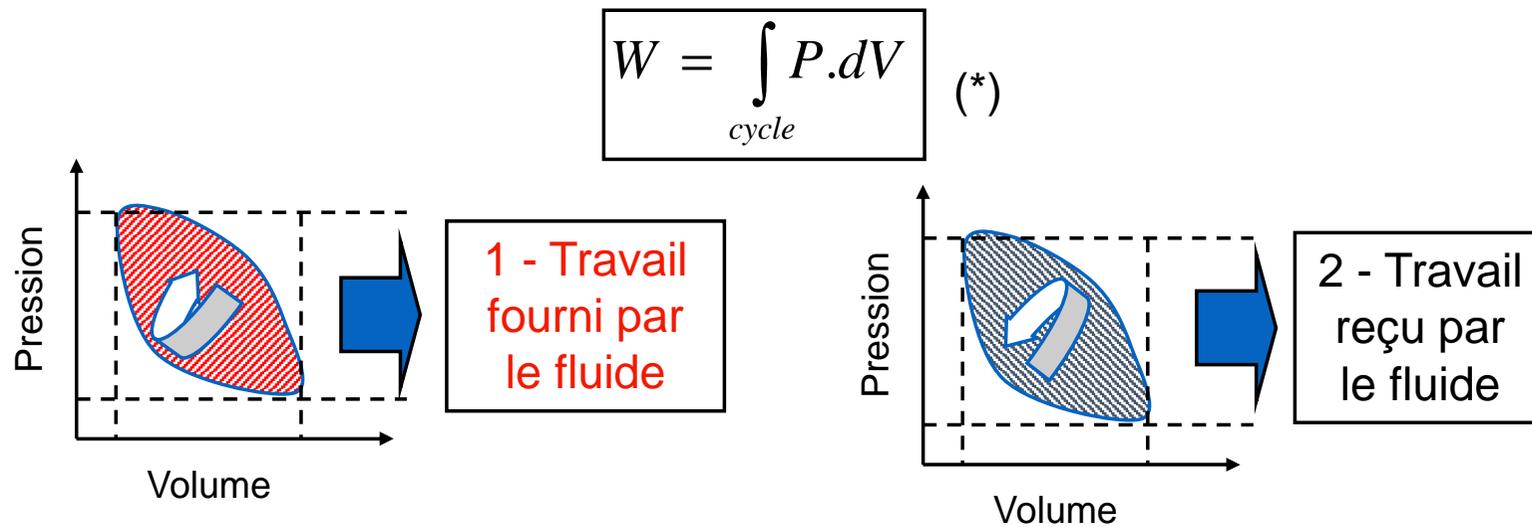
$$P(\text{Pa}) = \frac{F(\text{N})}{S(\text{m}^2)} \quad V(\text{m}^3) = S(\text{m}^2) \times L(\text{m})$$

$$P \times V = \frac{F}{S} \times S \times L = F \times L = E(\text{J})$$

La surface d'un cycle (pression x volume) représente l'énergie (ou travail) reçue par le piston.



- Travail (W) fourni par un fluide sur un cycle :

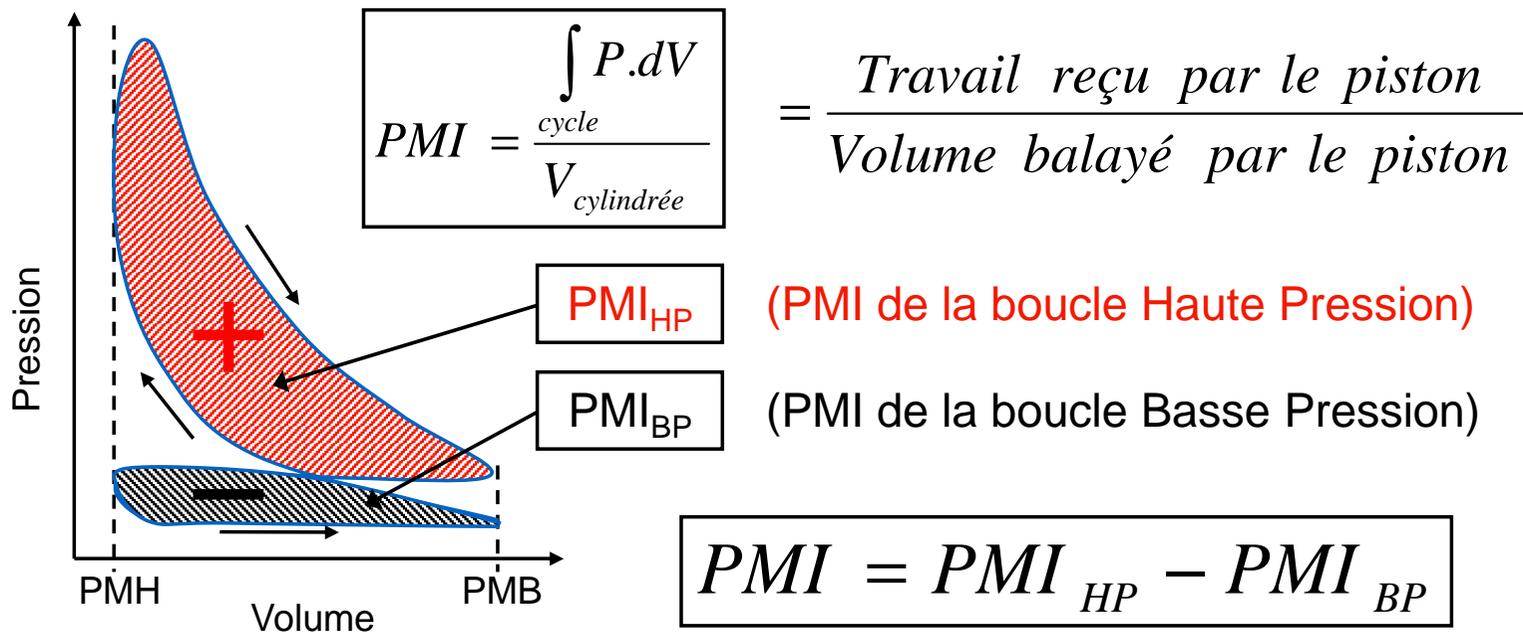


Le travail reçu par le piston est calculé par la formule (\*)

→ **Travail indiqué** :  $W_i$

Le piston reçoit de l'énergie dans le cas 1 et en perd dans le cas 2.

- PMI = Pression moyenne appliquée sur le piston pendant un cycle (pression fictive)



## Relations importantes

### ● La puissance indiquée $P_i$

#### ● Définition

$$P_i (W) = \frac{W_i (J)}{\Delta t (s)}$$

#### ● Relation Cheval – Watt

$$1 \text{ Cheval} = 745,7 \text{ Watt}$$

### ● Le couple indiqué $C_i$

$$C_i (N.m) = \frac{P_i (W)}{\omega (rad / s)}$$

### ● Relation PMI – Couple indiqué

$$PMI (bar) = \frac{4\pi}{100} \frac{C_i (N.m)}{V_{cylindrée} (dm^3)} \approx 0,126 \frac{C_i (N.m)}{V_{cylindrée} (dm^3)}$$

### ● Relation PMI – Puissance indiquée

$$PMI (bar) = \frac{1200 \cdot P_i (kW)}{V_{cylindrée} (dm^3) \cdot N (tr / min)}$$

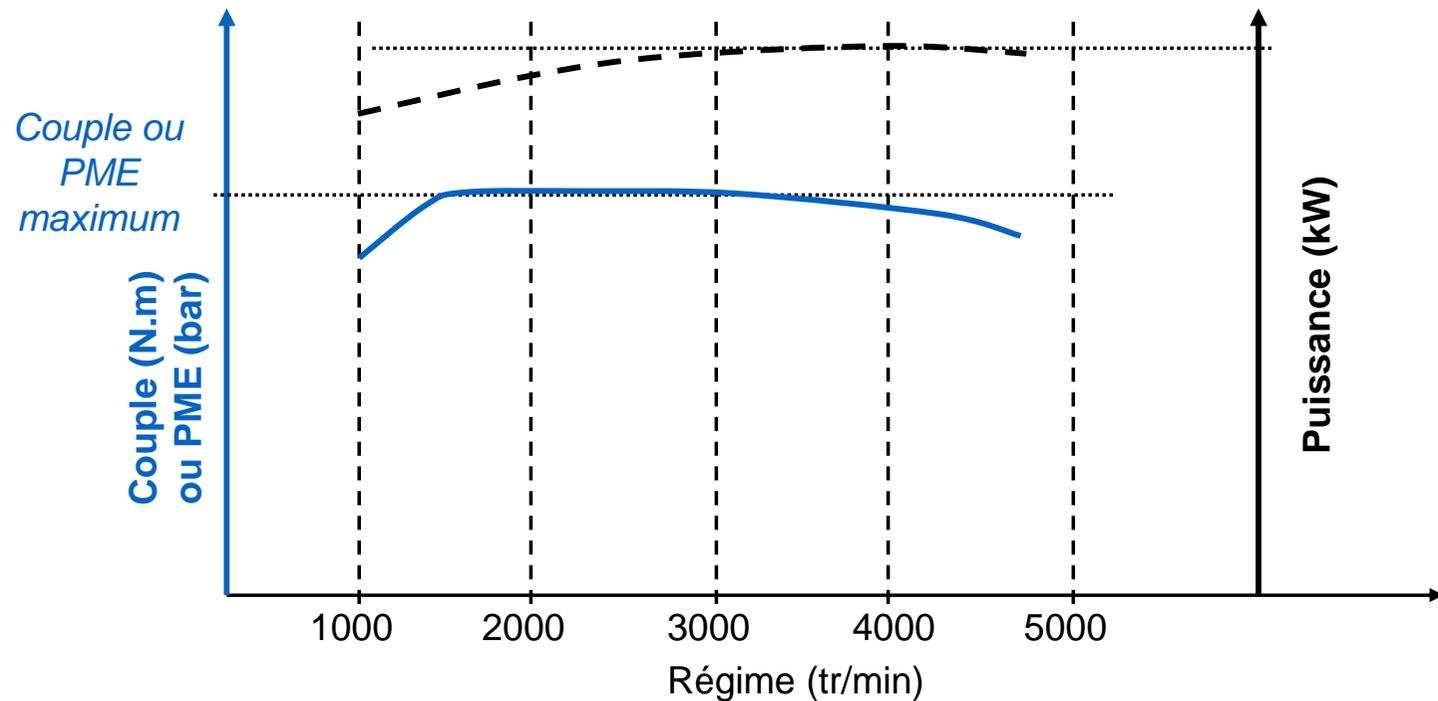
### ● Conservation de l'énergie

$$P_e = P_i - P_f$$

- Puissance effective  $P_e$  récupérée en bout d'arbre moteur (vilebrequin)
- Puissance de frottement  $P_f$  dissipée par le frottement des pièces tournantes, les accessoires...

## Intérêt de la pression moyenne et relation couple / puissance

- La Pression Moyenne est :
  - une grandeur adimensionnelle
  - proportionnelle au couple moteur
  - qui permet de comparer des moteurs de cylindrées différentes
    - Un moteur de 2 litres de cylindrée développant 300 N.m de couple maximum aura la même PME qu'un moteur de 1 litre de cylindrée développant 150 N.m.
- La PMI (ou PME) permet d'avoir un ordre de grandeur de la charge thermique du moteur



$$P_e (W) = C_i (N.m) \times \omega (rad / s) = \frac{2\pi}{60} C_i (N.m) \times N (tr / min)$$

## La combustion : un processus de conversion énergétique

- Le processus de combustion permet de transformer de l'énergie chimique en énergie thermique
- Premier principe de la thermodynamique

$$\Delta H = dQ = m.C_p.(T_2 - T_1)$$

combustion → dégagement d'énergie  
 →  $dQ > 0$   
 → augmentation de température

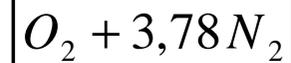
- Augmentation de T → Augmentation de P d'après la loi des gaz parfaits :  $P.V = m.r.T$

- Objectif du motoriste : optimiser cette transformation pour obtenir
  - un maximum de puissance pour diminuer les dimensions et le poids du moteur
  - un maximum de rendement, pour diminuer la consommation
  - un minimum d'émissions polluantes pour être compatible avec les normes de pollution
  - un minimum de bruit (acceptation client)
- L'ensemble de ces objectifs à atteindre sont très souvent antagonistes → Compromis coût / prestation / émissions

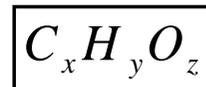
# Principe de la combustion

## Les réactifs de la réaction

- Le comburant : l'air
  - 20,9% de dioxygène O<sub>2</sub>
  - 78,1% de diazote N<sub>2</sub>
  - Autres gaz : CO<sub>2</sub> (autour de 0,03%), gaz rares (Ar, Ne, He, Kr, Xe) et vapeur d'eau
  - Composition moyenne :



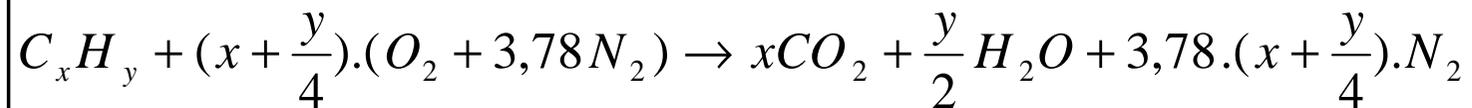
- Le carburant :
  - Composition de 100 à 150 corps purs différents
  - Composition moyenne :



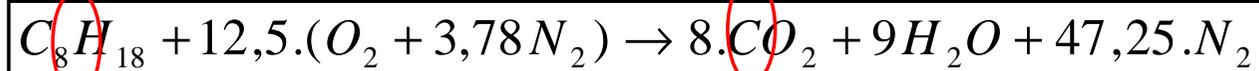
# Principe de la combustion

## Équation

- Pour un carburant  $C_xH_y$ , l'équation de combustion est la suivante :



- Exemple : essence modèle  $C_8H_{18}$  :



- **Consommation** (de carburant) et **émissions de  $CO_2$**  sont donc proportionnelles

# Principe de la combustion

## Pouvoir comburivore

- On définit le Pouvoir Comburivore (PCO) comme la quantité d'air nécessaire pour brûler 1g de carburant :

$$\psi_s = \left( \frac{\text{masse d'air}}{\text{masse de carburant}} \right)_{\text{stoechiométrique}}$$

$$\psi_s = \frac{(x + \frac{y}{4}) \cdot (16 \times 2 + 3,78 \times 14 \times 2)}{x \times 12 + y \times 1} = 34,49 \cdot \frac{4 + \frac{y}{x}}{12 + \frac{y}{x}}$$

$$\psi_s = 34,49 \cdot \frac{4 + \frac{y}{x}}{12 + \frac{y}{x}}$$

Le PCO est uniquement dépendant du rapport H/C du carburant

# Principe de la combustion

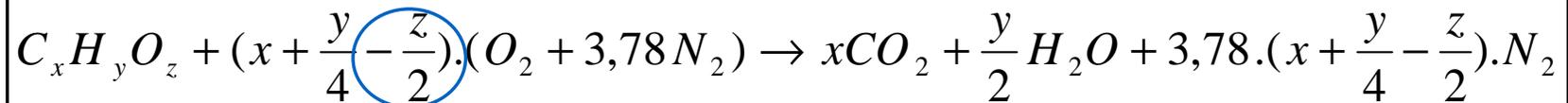
## Pouvoir comburivore

- $\text{PCO}(\text{C}_8\text{H}_{18}) = 15,1$  (essence modèle)
  - 15,1 d'air sont nécessaires pour brûler 1g de carburant
- $\text{PCO}(\text{C}_{12}\text{H}_{26}) = 15$  (gasoil modèle)
- $\text{PCO}(\text{CH}_4) = 17,2$
- $\text{PCO}(\text{H}_2) = 34,5$
  
- Plus la molécule de carburant est "petite"
  - plus le rapport H/C augmente (généralement)
  - plus il est nécessaire de disposer d'air pour brûler le carburant à la stoechiométrie
  - moins le carburant émettra de  $\text{CO}_2$

# Principe de la combustion

## Équation pour carburant oxygéné

- Pour un carburant  $C_xH_yO_z$  (carburant oxygéné) l'équation de combustion est la suivante :



- Le carburant oxygéné "apporte" lui même son oxygène donc nécessite moins de comburant (en volume) pour brûler à la stoechiométrie

# Principe de la combustion

## Pouvoir comburivore du carburant oxygéné

- PCO d'un carburant oxygéné :

$$\psi_s = 34,49 \cdot \frac{4 + \frac{y}{x} - 2\frac{z}{x}}{12 + \frac{y}{x} + 16\frac{z}{x}}$$

- Plus le rapport O/C est important
  - plus le PCO est faible et moins la combustion nécessite d'air (O apporté par le carburant lui-même).
  - $\text{PCO}(\text{CH}_3\text{OH}) = 6,5$  (Méthanol)
  - $\text{PCO}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 9$  (Éthanol)

# Principe de la combustion

## Notion de richesse

- On définit la richesse comme le rapport :

$$\Phi = \frac{\left( \frac{\text{masse de carburant}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{réel}}}{\left( \frac{\text{masse de carburant}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{stoechiométrique}}}$$

- Richesse

- =1 → Mélange à la stoechiométrie
- <1 → Mélange pauvre (excès d'air)
- >1 → Mélange riche (excès de carburant)  
Combustion nécessairement incomplète

$$\Phi = \psi_s \left( \frac{\text{masse de carburant}}{\text{masse d'air}} \right)_{\text{réel}}$$

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} \quad (\text{Lambda})$$

# Le pouvoir calorifique à pression constante

## Définition

- La réaction de combustion est associée à un dégagement de chaleur



- $\Delta H_c$  = Enthalpie de combustion (à pression constante)
  - Quantité de chaleur qu'il faut enlever aux gaz brûlés pour les ramener à  $T_0$ , température du système avant la combustion
- Pouvoir calorifique =  $-\Delta H_c$
- Correspond à la différence entre les enthalpies de formation des produits et des réactifs

# Le pouvoir calorifique à pression constante

## Définition

- Pouvoir calorifique massique
  - Quantité d'énergie dégagée par unité de masse (kJ/kg)
  - PCI = Pouvoir Calorifique Inférieur
  - Exemples :
    - Supercarburant = 42 900 kJ/kg
    - Gazole = 42 600 kJ/kg
    - Méthane = 50 000 kJ/kg
    - Hydrogène = 120 000 kJ/kg
    - Méthanol = 19 900 kJ/kg
    - Éthanol = 26 800 kJ/kg

# Les différents modes de combustion

## Deux types de flammes

- Flamme de pré-mélange
  - Mélange combustible – comburant homogène avant l'allumage de la charge
- Flamme de diffusion
  - La vitesse de diffusion des réactifs l'un vers l'autre contrôle le phénomène de propagation

# Les différents modes de combustion

## Synthèse

- Les deux principaux modes de combustion dans les moteurs classiques

<b>Moteur à allumage</b>	<b>Carburant</b>	<b>Allumage</b>	<b>Modes</b>
commandé	Essence, Gaz	source d'inflammation (bougie)	Pré-mélange
par compression	Gazole	Auto-inflammation	Pré-mélange puis diffusion

# Le moteur à allumage commandé

*1- Fonctionnement : rappels et approfondissements*

*2- Maîtrise des émissions polluantes*

*3- Réduction des émissions de CO2 (conso)*

*4- Evolutions actuelles et à venir*

---



## Moteur à allumage commandé : définition

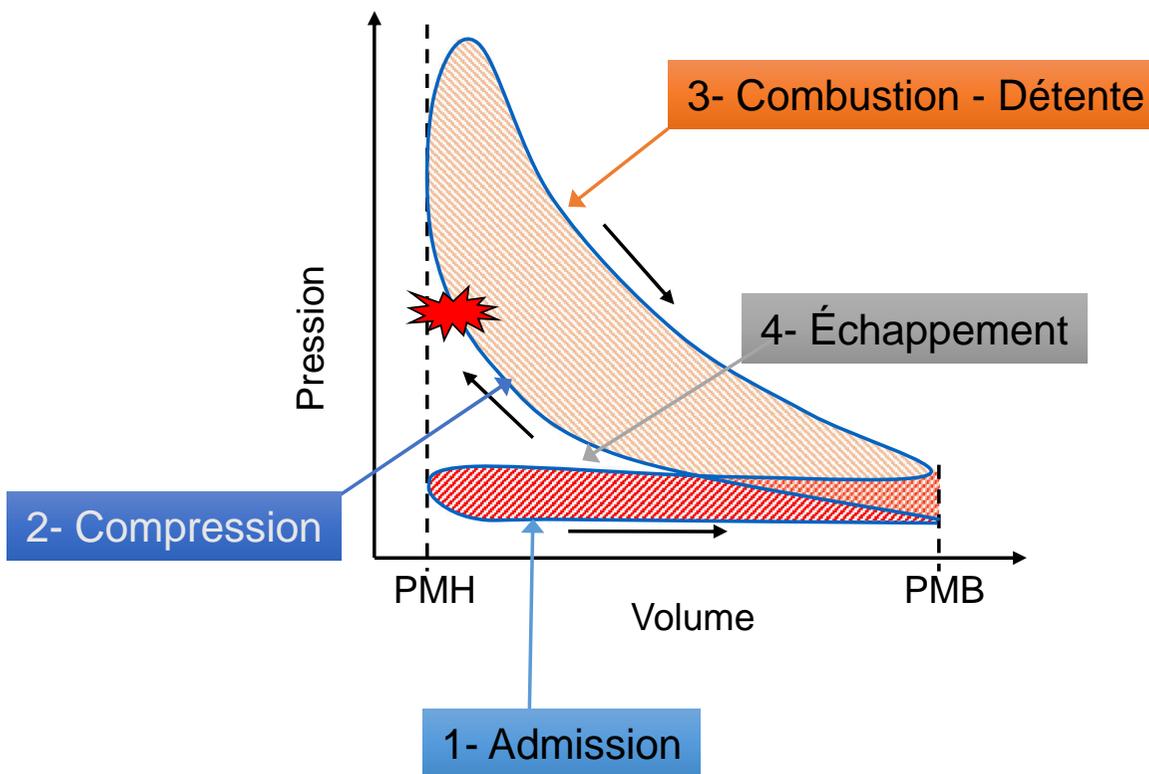
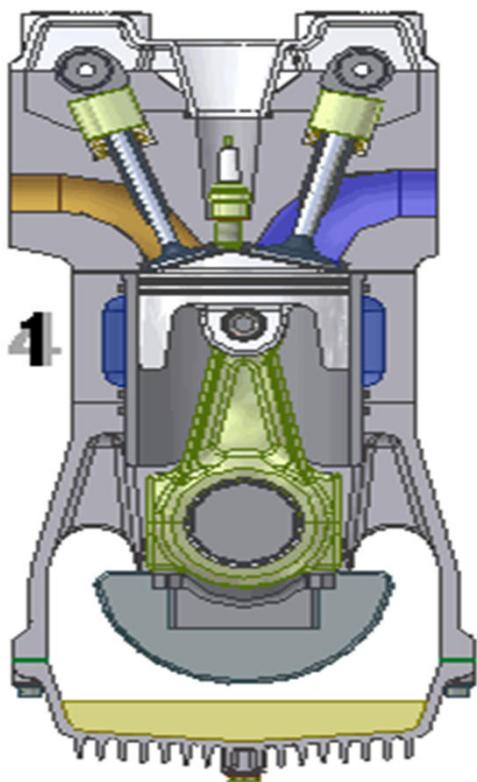
### ● La combustion est déclenchée par un apport d'énergie extérieur

- Quasi exclusivement une étincelle générée par une bougie
- Lasers ou micro-ondes à l'état de recherche

### ● Carburants utilisés :

- Le carburant le plus courant est L'E10
  - SP95 avec 10% maximum d'éthanol
- On trouve également :
  - essence et/ou éthanol (les moteurs "flex fuel")
  - éthanol pur (agro-carburant) :
  - GNV (Gaz Naturel pour Véhicule = méthane) :
  - GPL (Gaz de Pétrole Liquéfiés)

## Rappel : le cycle 4 temps et le diagramme PV



## 2 types de combustion possible

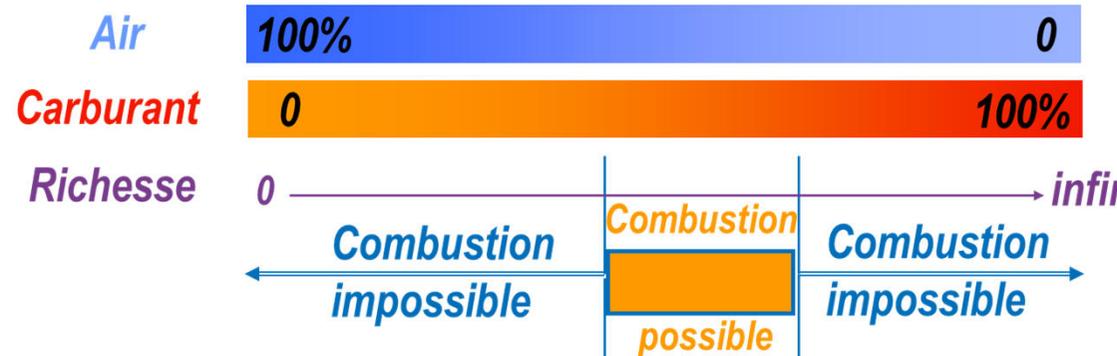
### ● Combustion homogène

- Le mélange enfermé dans la chambre de combustion est un mélange homogène air/carburant
  - richesse globale  $\in [0.6 ; 3]$
- Flamme de prémélange dans un milieu homogène

### ● Combustion stratifiée

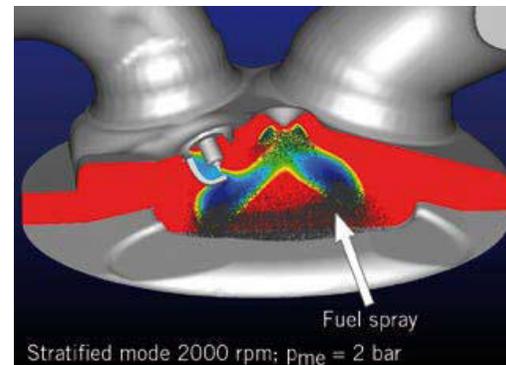
- Le mélange enfermé dans la chambre de combustion est un mélange hétérogène air/carburant
  - richesse locale (à proximité de la bougie)  $\in [0.6 ; 3]$
  - possibilité de fonctionner avec une richesse globale en dessous des limites d'inflammabilité

### Mélange homogène air + carburant (vapeur)



#### Richesses limites d'inflammabilité :

Essence :	0,6	3
Méthane :	0,5	1,7
Hydrogène :	0,1	6,9



Mixture distribution

rich  $\lambda=1$  lean

## Le déroulement de la combustion normale : 4 phases

### ● Allumage : apport local d'énergie par la bougie (30 à 100 mJ)

- Ionisation locale du mélange : création d'un plasma

### ● Initiation

- Le plasma créé évolue en noyau de flamme auto-entretenu
  - initiation des réactions chimiques
  - notion de taille critique

### ● Propagation

- Transition vers un régime turbulent : importance du taux de plissement du front de flamme

### ● Extinction

- Raréfaction des réactifs au sein du mélange
- "Trempe" de la flamme aux parois / Coincement



## Les combustions anormales

### ● Cliquetis

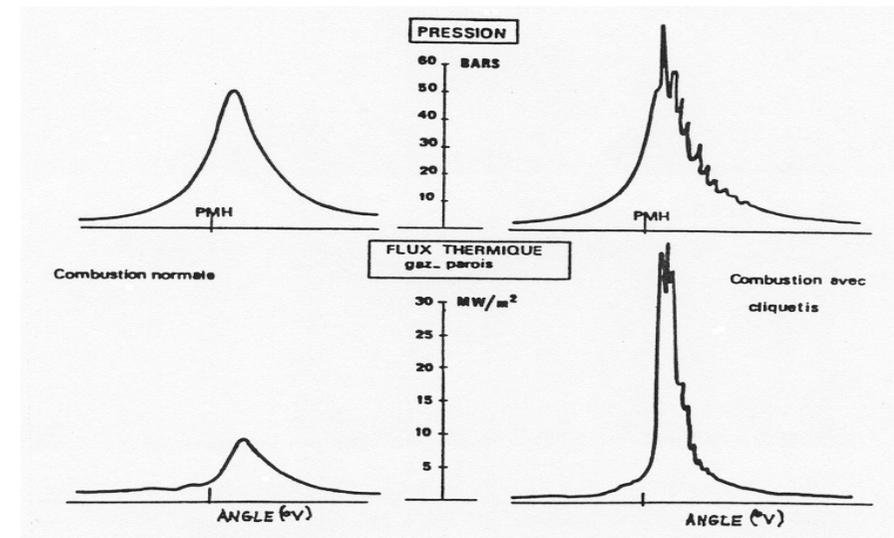
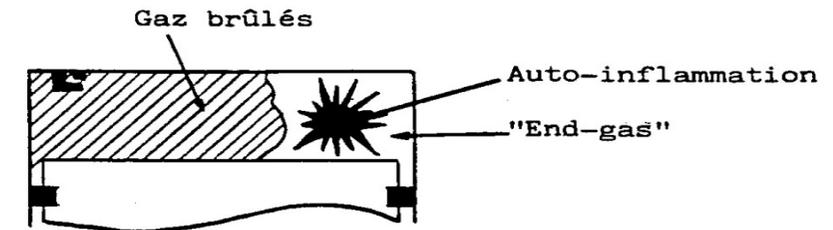
- Auto-inflammation en masse du mélange "coincé" entre le front de flamme et les parois de la chambre
- Destructif

### ● Pré-allumage

- Allumage spontané et anticipé (avant l'étincelle) de la charge produit par un point chaud
- Phénomène auto-entretenu et destructif

### ● Rumble

- Allumage localisé et anticipé d'une partie de la charge intervenant de manière sporadique
- Destructif



## Fonctionnement du moteur à allumage commandé

### ● Gestion du couple/travail produit :

- Il faut contrôler la quantité d'énergie dégagée par la combustion en tenant compte des limites d'inflammabilité

**Sur un moteur à allumage commandé classique (mélange homogène), la gestion du couple sur l'arbre de transmission est réalisée par le **contrôle de la masse de mélange (air + carburant)** enfermée dans la chambre**

### ● Contrôle de la masse de mélange introduite

#### ● Papillon

- Créer une dépression à l'admission (impact sur la densité et donc sur la masse introduite à iso volume)
- Actionneur principal d'un moteur à allumage commandé (homogène)

#### ● Distribution variable

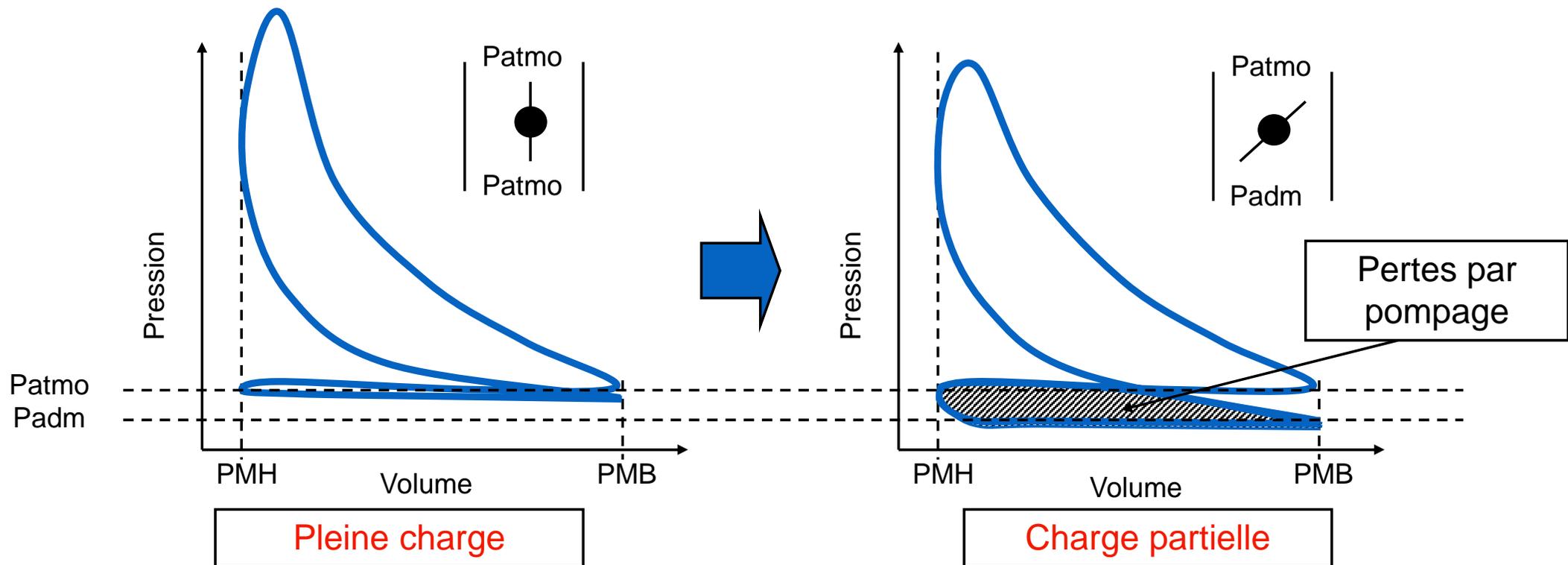
- Permet, dans une certaine mesure, de faire varier le volume effectif pour le mélange admis

#### ● Système de suralimentation

- Pour accroître la pression au-delà de la pression atmosphérique

## ● Réglage de la charge (ou du couple) par la variation de pression d'admission

- La fermeture du papillon augmente la PMI BP et donc la consommation du moteur thermique



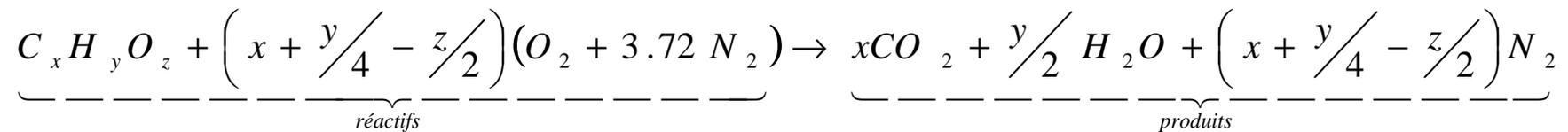
## Equation de combustion

### ● Nature du carburant :

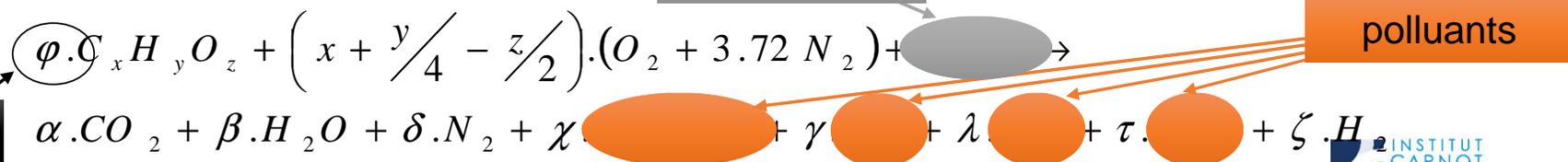
- Essence : composé de nombreux hydrocarbures
- Formule moyenne : SP95 :  $C_7H_{13}$  E5 :  $C_7H_{13}O_{0.1}$

### ● Réaction d'oxydation

- L'oxydation du carburant dans l'air est une réaction exothermique
- Réaction idéale équilibrée (stoechiométrie)

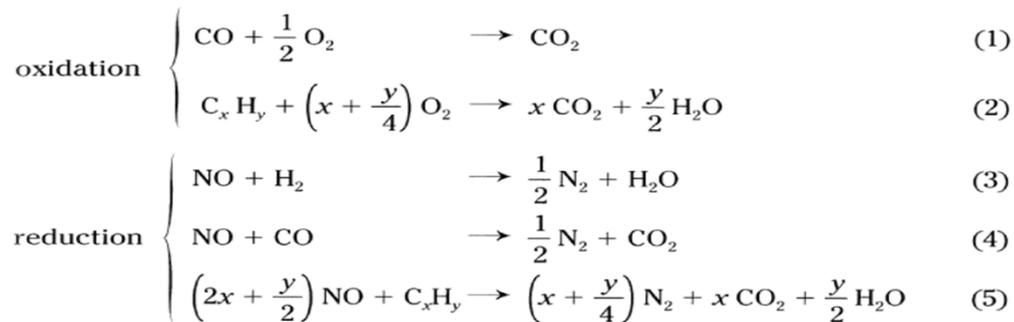
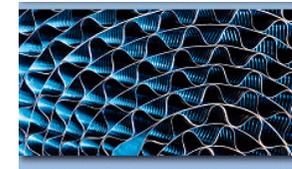
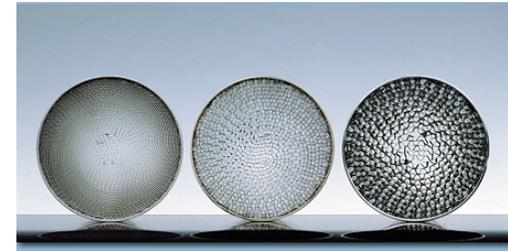


### ● Réaction "réaliste"

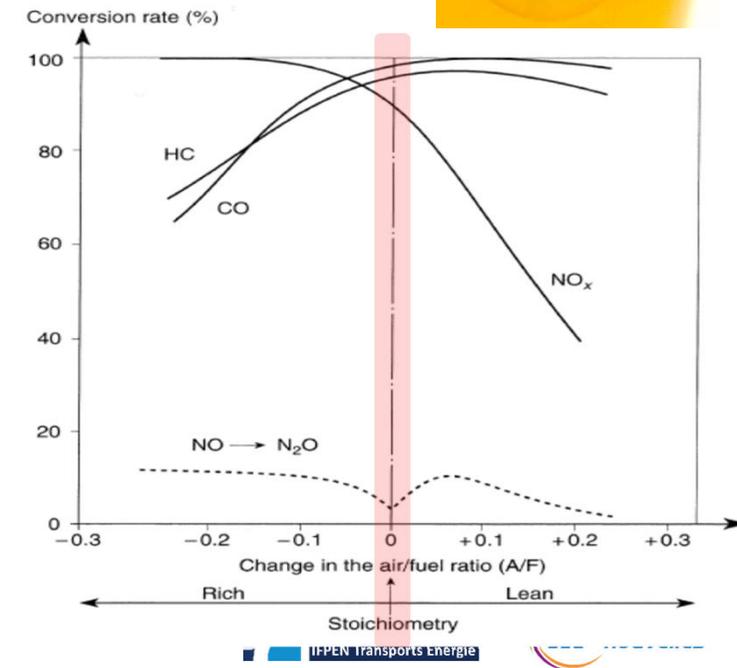


## La maîtrise des émissions polluantes : le catalyseur 3 voies

- Support métallique ou céramique à grande surface
- Enrichie en métaux précieux : platine / rhodium / palladium
- Permet d'oxyder HC, CO et de réduire NOx
  - Impose un milieu oxydant ET réducteur : la stoechiométrie
  - Fonctionnement moteur à richesse 1 → Impact consommation

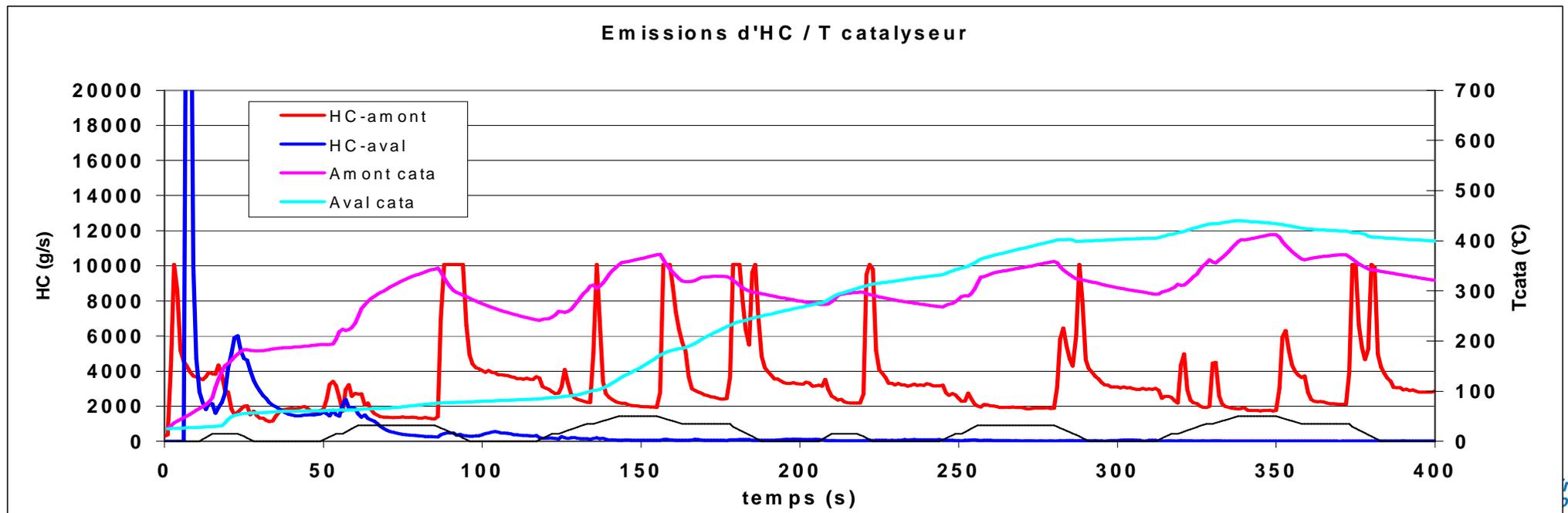


source : Guibet, 1999



### ● Montée progressive de la température jusque la température d'activation

- Grâce à l'enthalpie contenue dans les gaz d'échappement
- Grâce à des réglages spécifiques permettant d'augmenter l'enthalpie :
  - Décalage de la combustion dans la détente (retard d'avance à l'allumage)
  - Augmentation de la charge sur un véhicule hybride (recharge batterie)



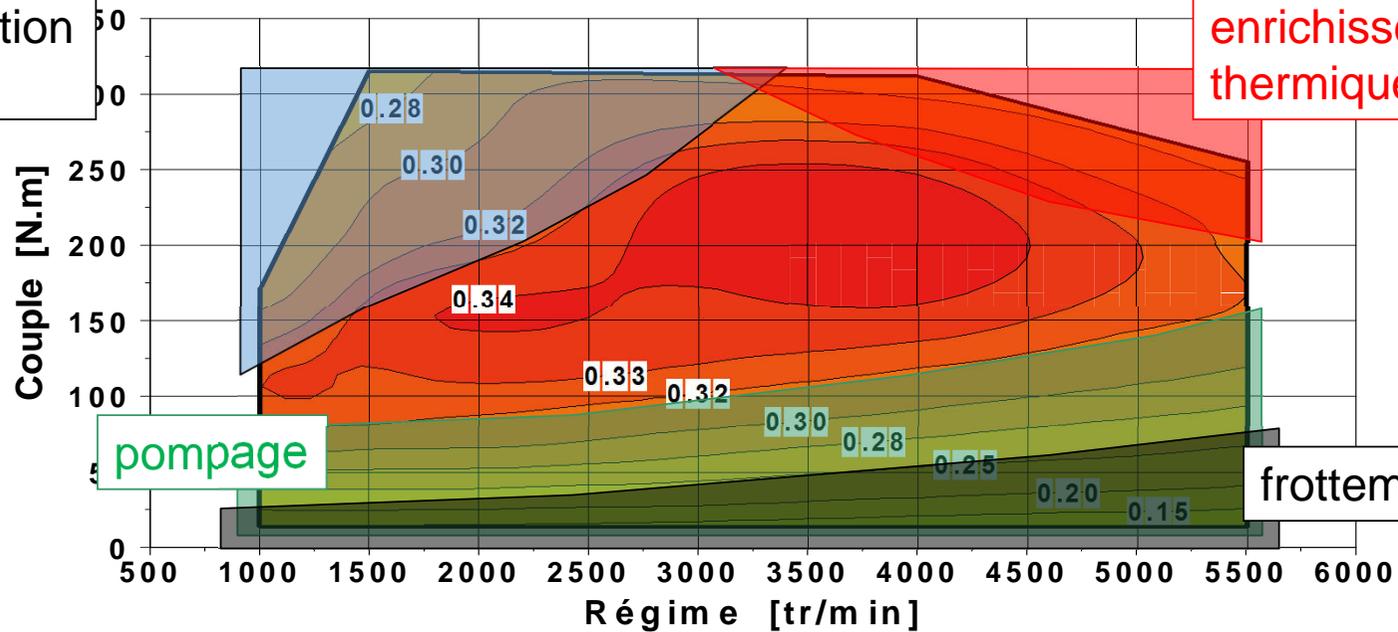
## ● Exemple d'un moteur suralimenté à combustion homogène



rendement global [-]

calage de combustion cliquetis

enrichissement : thermique soupape



## Evolutions technologiques pour améliorer le rendement

### ● Nouvelles technologies utilisées aujourd'hui

- L'injection directe
- Le downsizing / le downspeeding
  - Réduction de la cylindrée et du régime de fonctionnement des moteurs
- La distribution variable
  - Principe : dégradation du rendement volumétrique
  - Cycles de Miller/Atkinson

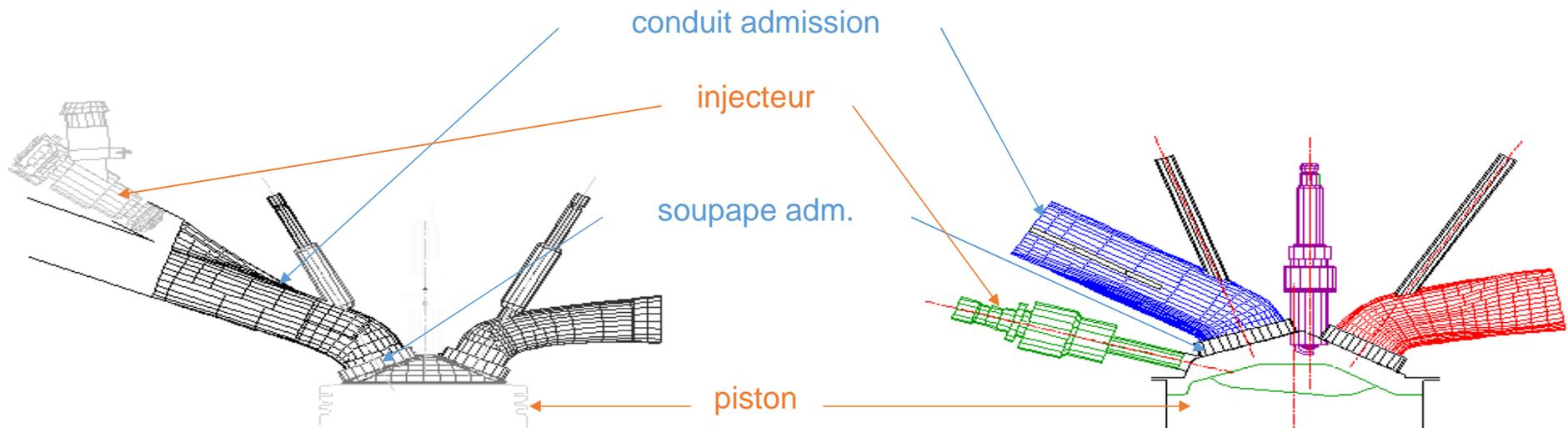
### ● Autres procédés / technologies peu déployés ou en cours de "maturation"

- La combustion en mélange pauvre
  - Mélange pauvre homogène
  - Combustion stratifiée
- Désactivation de cylindre
- Utilisation d'EGR
- Le taux de compression variable

## Injection indirecte (IIE) et injection directe (IDE)

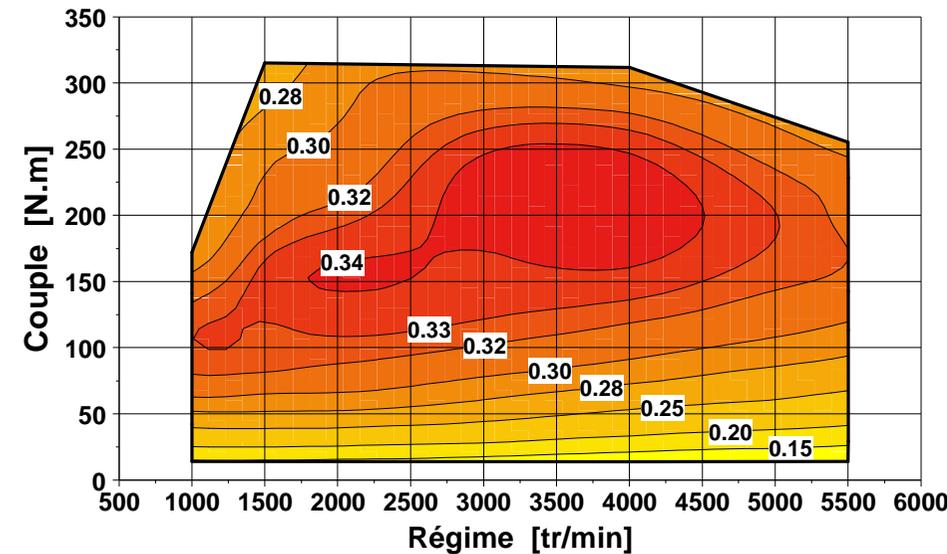
### ● Architecture

- En IIE, le mélange est préparé dans les pipes d'admission
- En IDE, le carburant est introduit directement dans la chambre



## Constat sur l'utilisation des moteurs

- **La plupart du temps, les moteurs sont utilisés à faible charge**
  - Zones de mauvais rendement pour les moteurs à allumage commandé conventionnels
  - Consommation excessive
  
- **Ordres de grandeur de puissance pour faire fonctionner un véhicule du segment moyen à vitesse stabilisée :**
  - 35 km / h : 2 à 3 kW environ
  - 70 km / h : 6 à 8 kW environ
  - 120 km / h : 20 à 30 kW environ
  
- **Un moteur actuel (P = 100 kW) est donc dimensionné pour des situations exceptionnelles**



# Le downsizing

## ● Principe

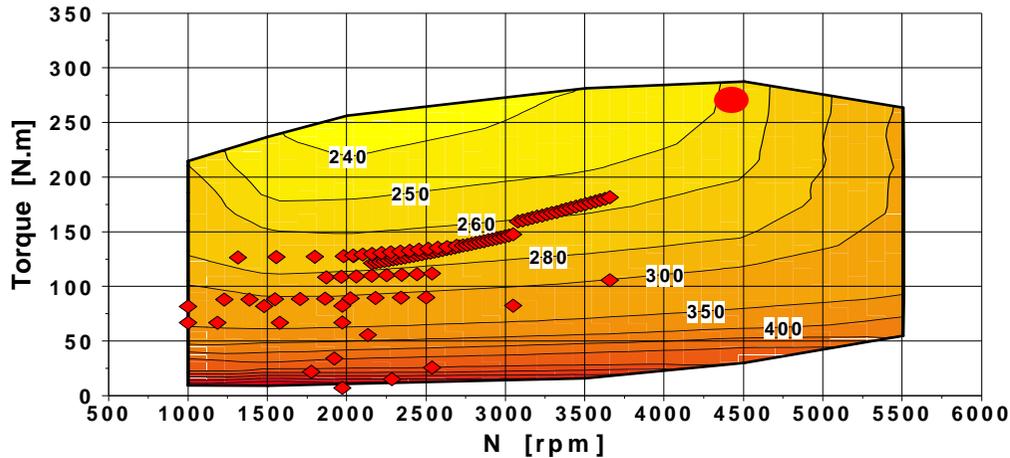
- Baisser la cylindrée pour faire fonctionner le moteur à plus fortes charges → Utilisation des zones de meilleur rendement

## ● Corollaire

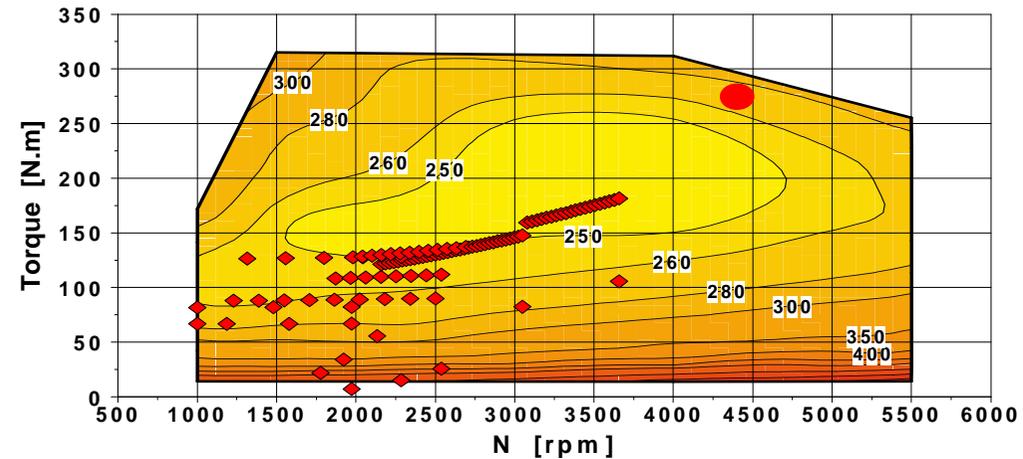
- Augmentation de la puissance et du couple spécifiques (N.m ou kW / litre de cylindrée)
- Utilisation indispensable d'un ou plusieurs organes de suralimentation pour maintenir (ou augmenter) les performances



BSFC (3.0l naturally aspirated)



BSFC (1.8l turbocharged)



## Le downsizing : package technologique privilégié

### ● Suralimentation

- indispensable

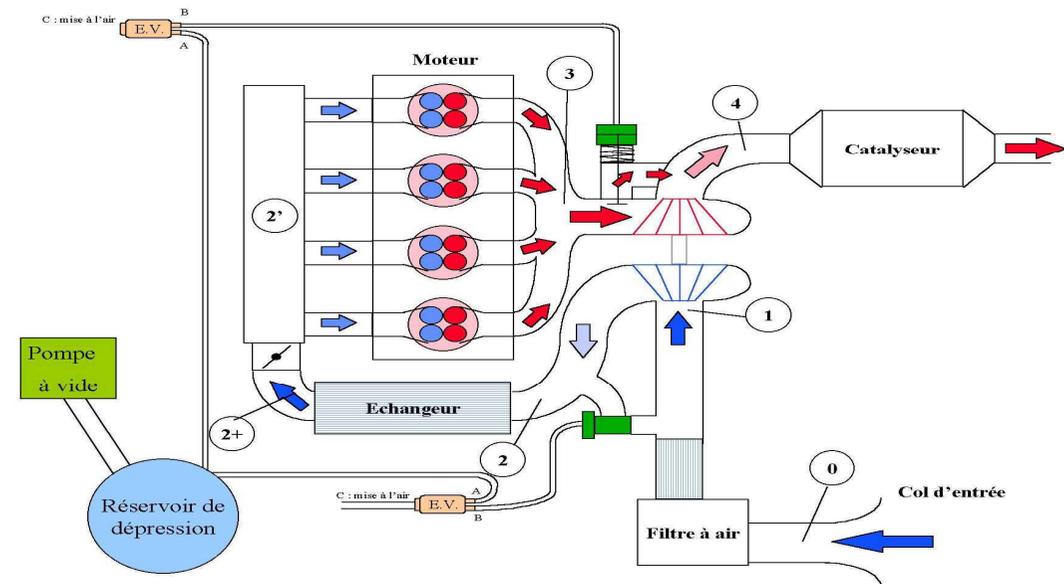
### ● Déphaseurs d'arbre à cames

- gain en consommation à charge partielle
- gain en couple à bas régime (balayage/amorçage turbo)

### ● Injection directe

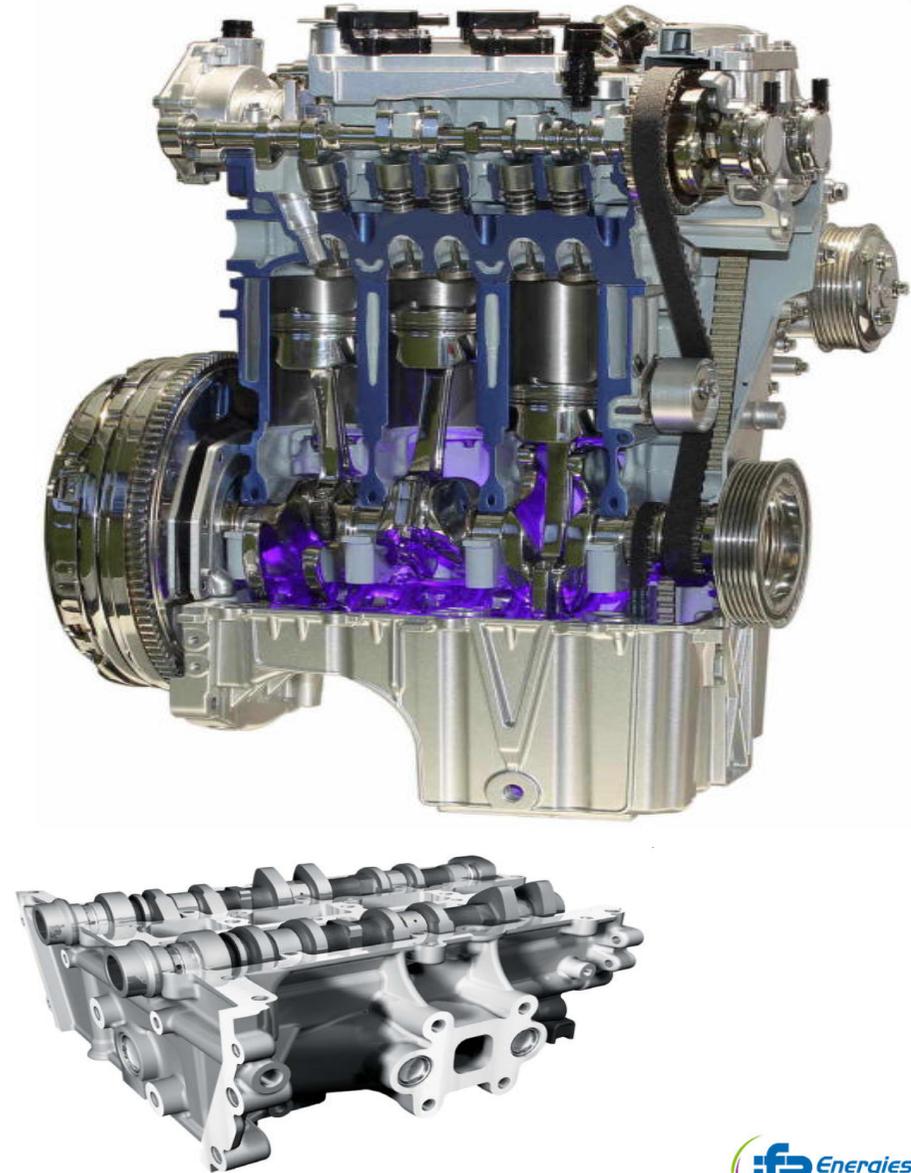
- gain sur le rendement théorique (taux de compression)
- simplicité pour réaliser du balayage

Moteur TU3J4TE : Synoptique



## Focus sur le moteur 3 cylindres Ford Ecoboost

- Performances : 92 kW, 200 N.m (pour 1 L)
- 3 cylindres
- cylindrée totale 1 L
- taux de compression : 10
- injection directe essence
- double système VVT avec calage distribution optimisé
  - couple élevé dès 1500 tr/min
  - temps de réponse (Tr90%) : 1,5s
- suralimentation par turbocompresseur
  - Diamètre : 38 mm
  - T maxi turbine = 1050 °C
  - Régime maxi = 240 000 tr/min
- conduits d'admission à forte turbulence
  - optimisation de la formation du mélange
- forme de bol peu profond
  - optimisation de la combustion homogène sur l'ensemble de la plage de fonctionnement
  - possibilité de fonctionner en stratifié à l'avenir



## Focus sur le moteur 3 cylindres Ford Ecoboost

- fonction « overboost »
  - PME maxi admissible = 25 bar (sur 2 secondes)
  - vilebrequin en fonte compact mais capable de tenir les charges élevées
  
- réduction des pertes par frottements
  - courroie de distribution crantée haute durabilité & bas frottements
  - désaxage vilebrequin (8 mm) pour réduire les frottements
  - pompe à huile à palettes à débit variables
    - fonctionnement sous 2 ou 4 bar de pression
  
- gestion des pertes thermiques
  - gicleurs de fond de pistons pour refroidissement
  - thermomangement optimisé
    - $T < 75^{\circ}\text{C}$  → circulation coupée dans le bloc et la culasse
    - $75^{\circ}\text{C} < T < 92^{\circ}\text{C}$  → circulation dans le bloc et la culasse
    - $T > 92^{\circ}\text{C}$  → circulation dans le radiateur
  - collecteur intégré (à la culasse)
  
- système stop & start



## La distribution variable

### ● Notion de rendement volumétrique

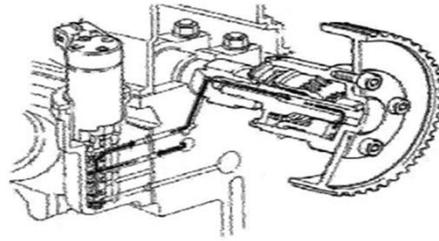
- Expression de la masse enfermée :  $m_{\text{enfermée}} = \eta_{\text{vol}} \cdot \rho_{\text{adm}} \cdot V_{\text{cyl}}$
- Pilotage du couple par le papillon = impact sur  $\rho_{\text{adm}}$

### ● Gain en conso par la distribution

- Principe : dégrader le rendement volumétrique en charge partielle
- A même masse enfermée (couple moteur), cela permet d'augmenter la pression admission → réduction du pompage
- Le croisement de soupape permet l'introduction de gaz brûlés résiduels
  - apport de chaleur favorable au mélange
  - limite en terme de stabilité de combustion (dilution)

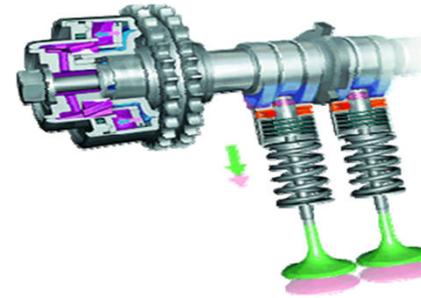
## La distribution variable : technologies

### ● Technologies



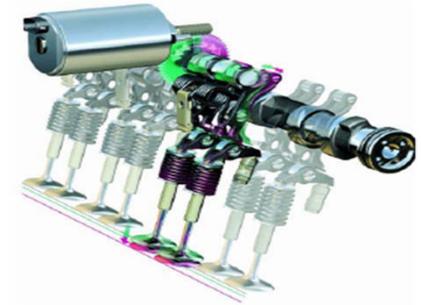
VVT

Déphasage des lois de levée



VVT+VVL

Déphasage + changement de profil (2 ou 3)

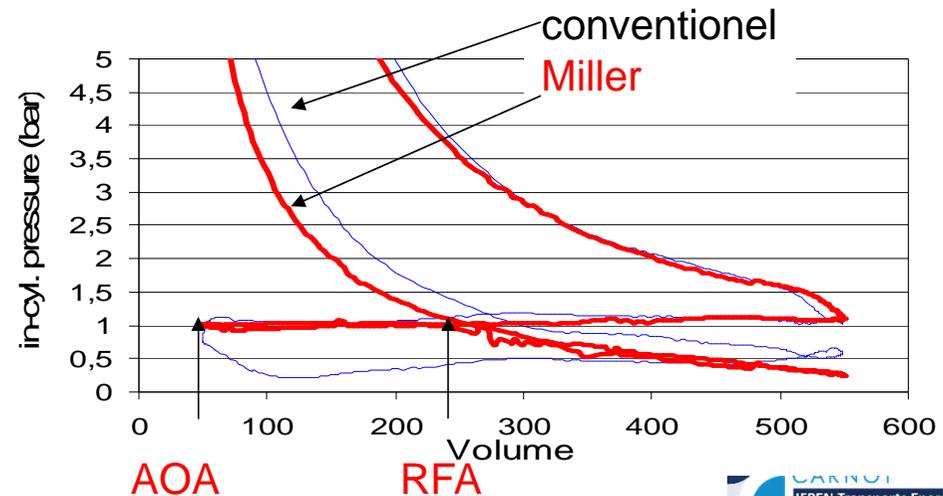


VVT+cVVL

Déphasage + changement de profil continu

### ● Cycle de Miller/Atkinson

- Fermeture anticipée/tardive de la soupape d'admission
- Principe déjà utilisé sur le moteur de la Toyota Prius
- Utilisation généralisée sur les futurs moteurs de l'ensemble des constructeurs



- **La dépollution des moteurs à allumage commandé est relativement aisée (sous réserve de fonctionnement à richesse 1 sur l'ensemble de la zone de fonctionnement).**
  - Par conséquent et pour conserver un catalyseur 3 voies (technologie mature), une grande majorité des évolutions envisagées ont pour objectif la réduction de la consommation.
  - Certains axes d'amélioration long terme ayant pour conséquences de fonctionner en mélange pauvre (gain en consommation) se heurteront à des problèmes de dépollution.
- **Les axes prioritaires de gain consistent à :**
  - Optimiser la zone d'utilisation : downsizing, dowspeeding, hybridation...
  - Minimiser les pertes par pompages indissociables du fonctionnement de ces moteurs : distribution variable
- **Le moteur allumage commandé est une technologie prometteuse qui peut encore progresser en rendement**
  - Mais il faudra faire attention à la dépollution, aux prestations et au coût!

# Le moteur Diesel

*1- Généralités*

*2- La combustion Diesel*

*3- La formation des polluants*

*4- Les solutions technologiques*

*5- La dépollution*

---



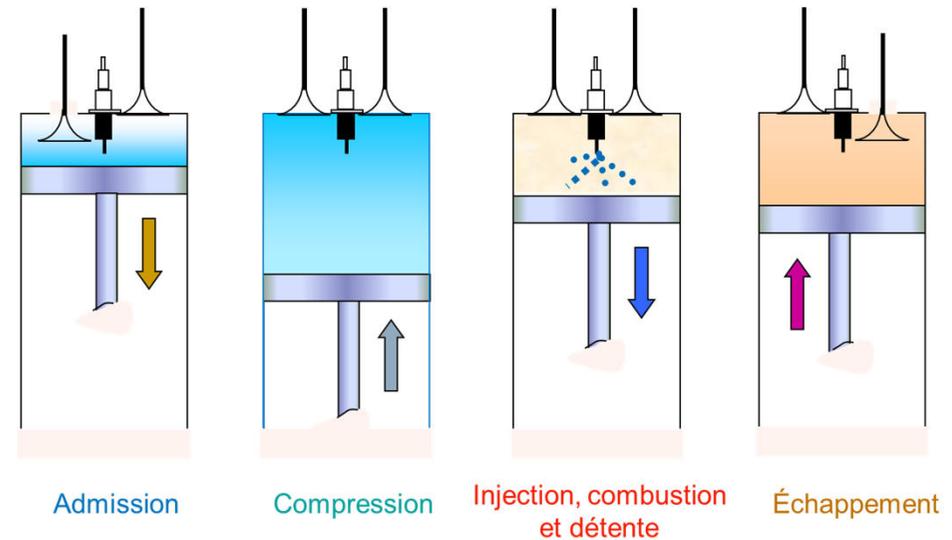
## Principe de fonctionnement du moteur Diesel

### ● Préparation du mélange carburé

- Alimentation de la chambre de combustion en air et éventuellement en gaz d'échappement recirculés (EGR)
- Introduction directe du carburant dans le cylindre après fermeture des soupapes via un système d'injection
  - Contrôle de la charge par la quantité injectée

### ● Processus d'auto-inflammation spontané du carburant sous l'effet des augmentations de pression et de température

La combustion Diesel est avant tout un processus de rencontre de l'air et du carburant dans la chambre de combustion



## Objectifs du moteur Diesel

### ● Objectifs : Prestations client et satisfaction des normes

#### ● Econome

- Ratio coût/valeur
- Consommation et dépenses d'entretien (coût total de possession)

#### ● Agréable

- Puissance et prestation dynamiques
- Bruit et vibrations

#### ● Respectueux de l'environnement

- Limitation des émissions : Oxydes d'azote NOx, Particules PM, Monoxyde de carbone CO, Hydrocarbures imbrûlés HC

### ● Moyens : maîtrise optimale du remplissage et de la rencontre air / carburant

#### ● Selon le point de fonctionnement du moteur

- Charge partielle / Pleine charge

#### ● Selon les conditions de fonctionnement

- Chaud / Froid ; Stabilisé / Transitoire

## Avantage du moteur Diesel vs. moteur à allumage commandé

- **Pas de vannage à l'admission pour contrôler la charge (fonctionnement pauvre) → Intérêt rendement**
- **Rapport volumétrique de compression plus élevé & compression uniquement d'air (sans carburant) → Intérêt rendement**
- **Oxydation plus complète (faibles émissions HC - CO) → Intérêt dépollution**
- **Frottements plus importants (pressions cylindre plus élevées, attelage mobile plus lourd) → Impact rendement**
- **Fonctionnement pauvre → Dépollution des NOx complexe et coûteuse**

## Performances du moteur Diesel

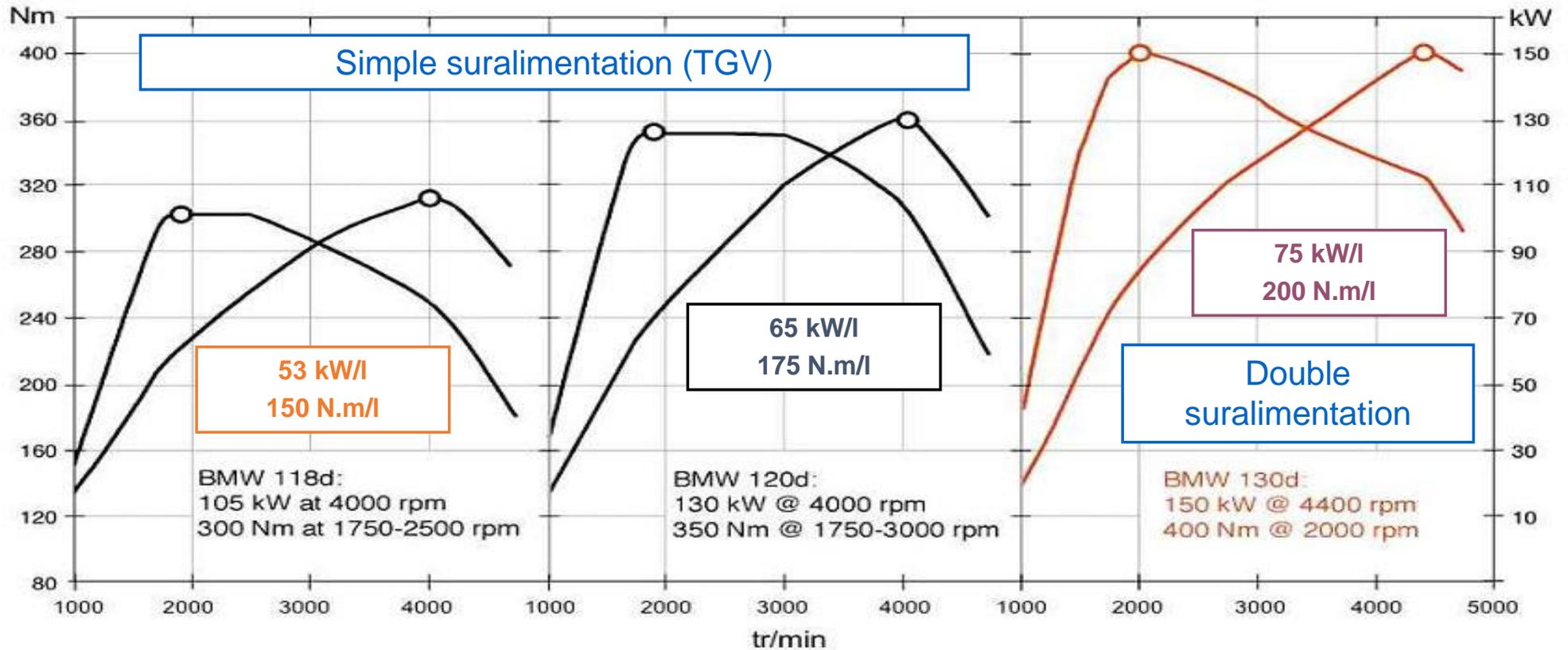
### ● Couple spécifique bas régime favorable à l'agrément d'utilisation et à l'adaptation moteur / véhicule

- Limité par le remplissage en air mais pas de limitation due au cliquetis comme en allumage commandé
- Moteurs haut de gamme ~ 180 à 200 N.m/l

### ● Puissance spécifique

- Limitée par l'utilisation de l'air (fumées) ou température échappement (tenue thermomécanique collecteur)
  - Richesse maximale inférieure à la stœchiométrie  
~ 0,9 à faible régime et ~ 0,8 à haut régime
  - Régime maximal faible devant celui d'un moteur essence (4000 tr/min)
- Moteurs haut de gamme ~ 70 à 75 kW/l

# Performances du moteur Diesel



Source: Auto-innovation

## Différentes versions moteur 2l

P injection max (bar)	1600	1800	2000
P admission max (bar abs)	2.50	2.55	3.00
PME max (bar)	18.9	22.0	25.3

## Spécificités du moteur Diesel

- **Besoin d'un rapport volumétrique élevé pour favoriser les délais d'auto-inflammation les plus courts possibles**
  - Contrôle du début de combustion amélioré
  - Faibles instabilités cycle à cycle
- **Besoin d'une maîtrise de l'aérodynamique interne pour contrôler la déroulement de la combustion, notamment sa fin**
  - Génération de "swirl" via la géométrie des tubulures d'admission avec une légère perte de remplissage en contrepartie
  - Utilisation d'un bol dans le piston pour intensifier le "swirl" lors de la compression et maîtriser son évolution dans la phase de combustion
- **Absence de papillon des gaz à l'admission**
  - Diminution du "pompage" (pertes de charges par transvasement)

## Spécificités du moteur Diesel

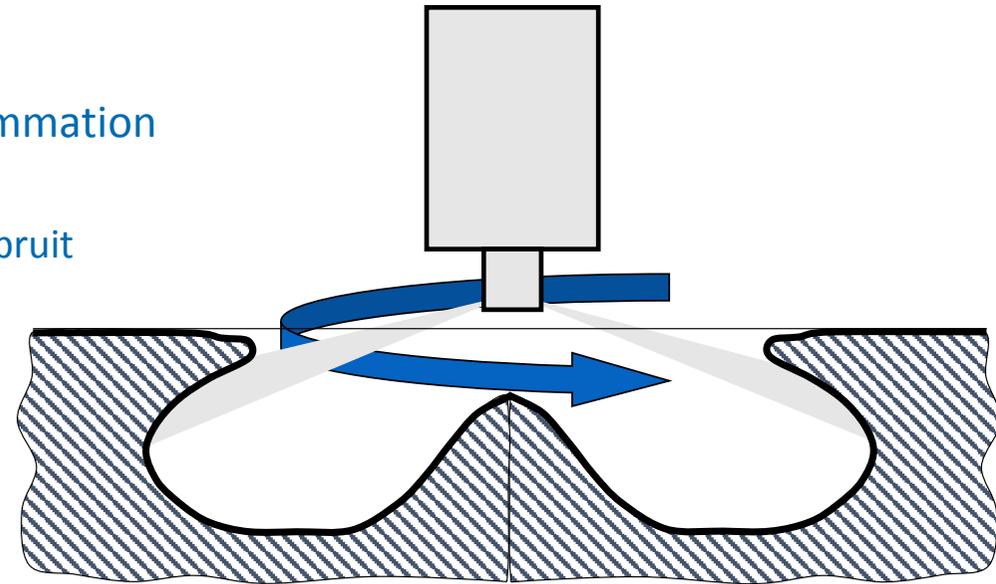
- **Besoin d'une conception moteur plus robuste à cause des niveaux de pression cylindre élevés**
  - Culasse plate ou quasi-plate
  - Attelage mobile (piston, axe, bielle..) et bâti renforcés
    - Accroissement du poids spécifique
  - Niveau vibratoire accru nécessitant un équilibrage dynamique
    - Damper et arbres d'équilibrage supplémentaires
  
- **Besoin d'un système d'injection très performant (rôle majeur dans le contrôle de la combustion en combinaison avec l'aérodynamique interne)**
  - Système haute pression "Common Rail"
  - Grande flexibilité de réglage : contrôle électronique du phasage et des quantités injectées (plusieurs injections par cycle)

## Combustion Diesel : que brûle-t-on ?

- Distillats moyens du pétrole ~ C14 à C25 (essence: ~C5 à C10 )
  - Masse volumique ~ 840 kg.m<sup>-3</sup> (~750)
  - Pouvoir calorifique massique ~ 43 MJ.kg<sup>-1</sup> (idem)
  - Pouvoir calorifique volumique ~ 36 MJ.l<sup>-1</sup> (~33)
  - **Indice de cétane caractérise le délai d'auto-inflammation**
    - Sa valeur augmente avec la diminution du délai
    - Spécification actuelle : 51 mini (valeur mesurée)
- Une forte propension à l'auto-inflammation est recherchée  
(au contraire du carburant des moteurs à allumages commandés)

## Combustion Diesel : principe

- **Flamme de prémélange**
  - Carburant accumulé durant le délai d'auto inflammation
  - Phase très rapide
    - Taux de dégagement d'énergie élevé génère un bruit caractéristique
  
- **Flamme de diffusion "contrôlée"**
  - Durant l'injection
  - Localisée à la périphérie du jet de carburant
  - Entretien par le taux d'introduction
  
- **Flamme de diffusion "non contrôlée"**
  - Après la fin d'injection
  - Combustion favorisée par l'aérodynamique interne, la localisation du carburant et la géométrie de la chambre



Mouvement aérodynamique généré par la culasse et entretenu par la forme du piston

## La formation des polluants : hydrocarbures imbrûlés (HC) et monoxyde de carbone (CO)

### ● Traduisent une oxydation incomplète ou inexistante

- Température insuffisante
  - Augmentation simultanée HC & CO
- Oxygène insuffisant (sous-mélange ou 'undermixing')
  - Augmentation du CO
  - Début d'oxydation donc augmentation limitée des HC
  - Augmentation simultanée des fumées si manque au niveau global de la chambre (richesse moyenne indique alors la faculté à utiliser l'air)
- Oxygène en excès (sur-mélange ou 'overmixing')
  - Zone pauvre, inférieure à la limite d'auto-inflammation
- Piégeage dans les interstices de la chambre
- Adsorption/désorption huile
- Instabilités de combustion (ratés)
- Formation film liquide

## La formation des polluants : oxydes d'azote NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)

### ● NO Thermique : Majoritaire

- Formation décrite par les mécanismes de Zeldovich
  - $N_2 + O \rightarrow NO + N$  /  $N + O_2 \rightarrow NO + O$  /  $N + OH \rightarrow NO + H$
- Forte dépendance aux conditions de température et de richesse

### ● NO précoce ou 'prompt-NO' : Minoritaire

- Formé à l'aide des radicaux CH
  - $CH + N_2 \rightarrow HCN + N$
- Radicaux CH produits uniquement dans la flamme
- Mécanisme favorisé dans les flammes riches

### ● NO carburant ou 'fuel-NO' : Négligeable (teneur infime des carburants en azote)

- Lié à la décomposition du combustible qui peut libérer des composés N<sub>x</sub>

## La formation des polluants : oxydes d'azote NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)

### ● Les NO<sub>2</sub> sont plus toxiques que les NO

### ● Sources des NO<sub>2</sub>

- Le NO oxydé pendant la phase de détente est majoritairement reconverti mais un manque de température stoppe la réaction : NO<sub>2</sub> à l'ouverture des soupapes
- Le NO est oxydé dans le système de post-traitement (catalyseur et filtre à particule) : NO<sub>2</sub> à l'échappement

## La formation des polluants : émissions de particules

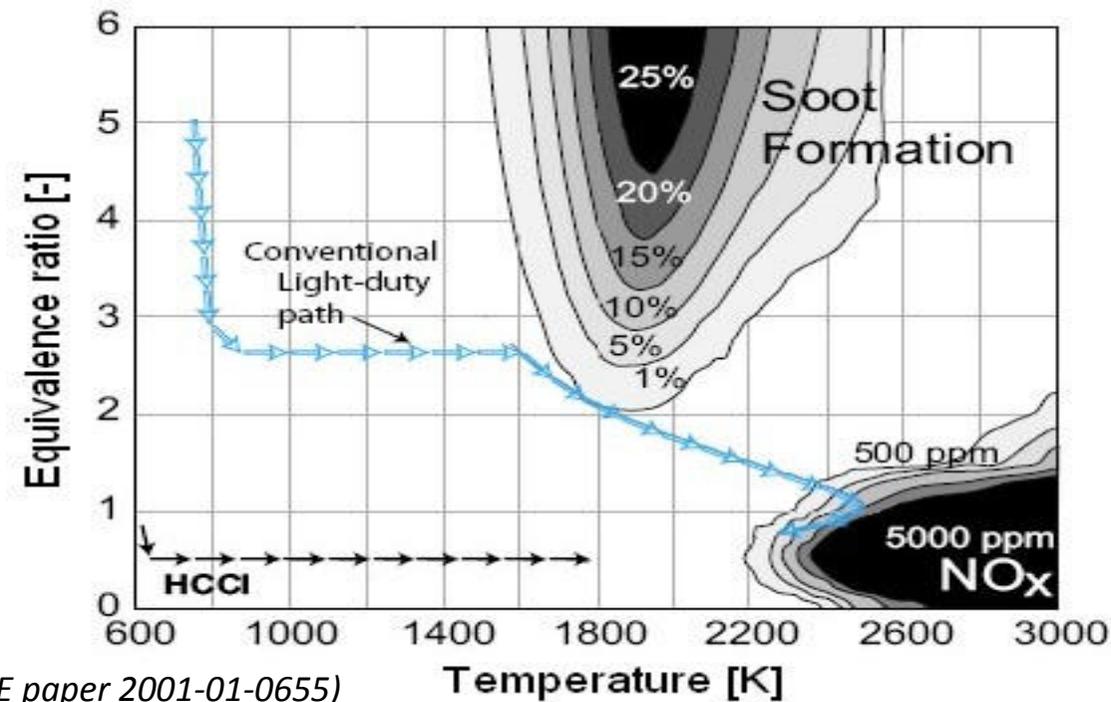
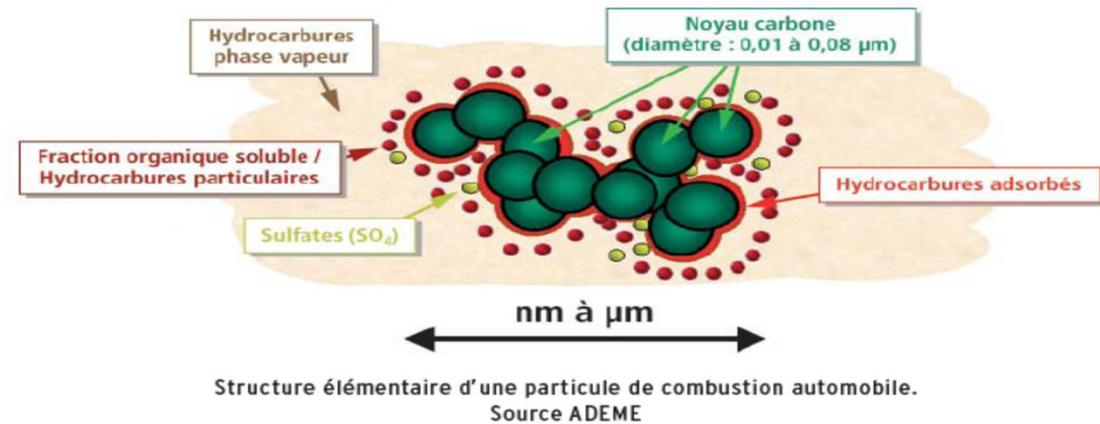
### ● Production selon mécanismes complexes en mélange riche à haute température

- A partir des produits de combustion en prémélange
- Par pyrolyse avant la combustion en diffusion
  - Mode de formation majoritaire (nucléation, grossissement, agglomération)

### ● Destruction par post-oxydation

- Majorité des suies oxydées dans la chambre (jusque 95%)

### ● Condensation et adsorption (fraction organique soluble)



## La formation des polluants : conditions de formation

### ● Production selon mécanismes complexes en mélange riche à haute température

- A partir des produits de combustion en prémélange
- Par pyrolyse avant la combustion en diffusion
  - Mode de formation majoritaire (nucléation, grossissement, agglomération)

### ● Destruction par post-oxydation

- Majorité des suies oxydées dans la chambre (jusque 95%)

### ● Condensation et adsorption (fraction organique soluble)

## Enjeux actuels des moteurs Diesels

### ● Contexte normatif

#### ● Norme €5 appliquée depuis fin 2009

- Forte réduction du seuil d'oxydes d'azote (-28% / €4)
- Réduction drastique du seuil d'émissions de particules (5 mg/km)
- Impose une quasi-généralisation du filtre à particules

#### ● Passage à €6 fin 2014

- Réduction drastique du seuil d'émissions d'oxydes d'azote (-68% / €4)
- Recours aux systèmes de post-traitement des NOx devant la difficulté d'atteindre le seuil à la source (80 mg/km)

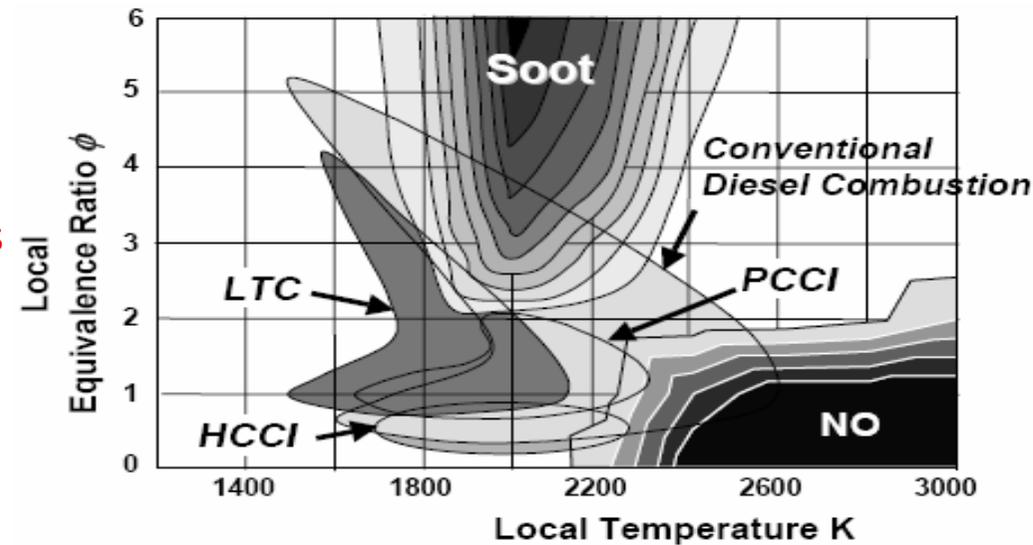
mg/km	CO	NOx	HC+NOx	PM	Date
Euro 3	640	500	560	50	2000
Euro 4	500	250	300	25	01/2005
Euro 5	500	180	230	5	09/2009
Euro 6	500	80	170	5	09/2014

Une grande partie des évolutions technologiques du moteur Diesel ont pour objectif la réduction des émissions polluantes (NOx en particulier).

## La réduction des NOx « à la source »

### ● Objectif :

- Réduire à la source les émissions d'oxydes d'azote et de particules **en évitant les combustion à température et à richesse élevées**
- HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition
- LTC : Low Température Combustion



### ● Inconvénient :

- En réduisant la température de combustion, ces modes de combustion présentent cependant l'inconvénient intrinsèque d'émettre plus de HC - CO que le mode de combustion conventionnel

### ● La combustion LTC (Low Temperature Combustion)

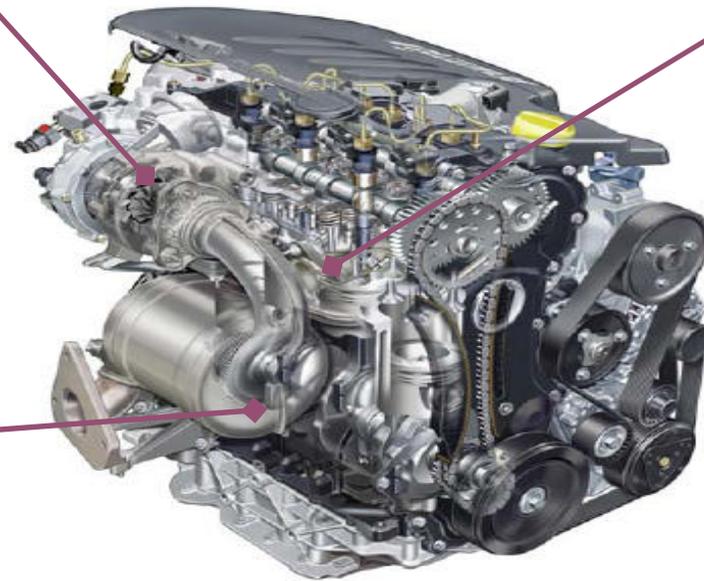
- Réduction des émissions par diminution de la température uniquement
- En pratique cela nécessite la recirculation de beaucoup de gaz brûlés retardant l'auto-inflammation et favorisant le prémélange

# Solutions technologiques pour moteur Diesel

SUSTAINABLE MOBILITY

## Boucle d'air

- Suralimentation
- Circuit EGR
- Distribution



## Système de combustion

- Chambre (bol)
- Aérodynamique (swirl)
- Injection

## Post-traitement

- HC/CO (DOC)
- PM (DPF)
- NOx (SCR / DeNox)

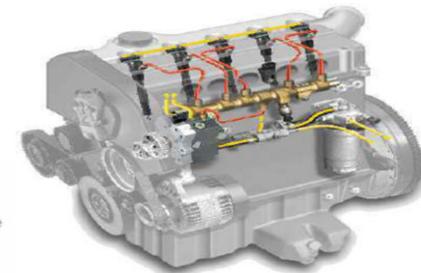
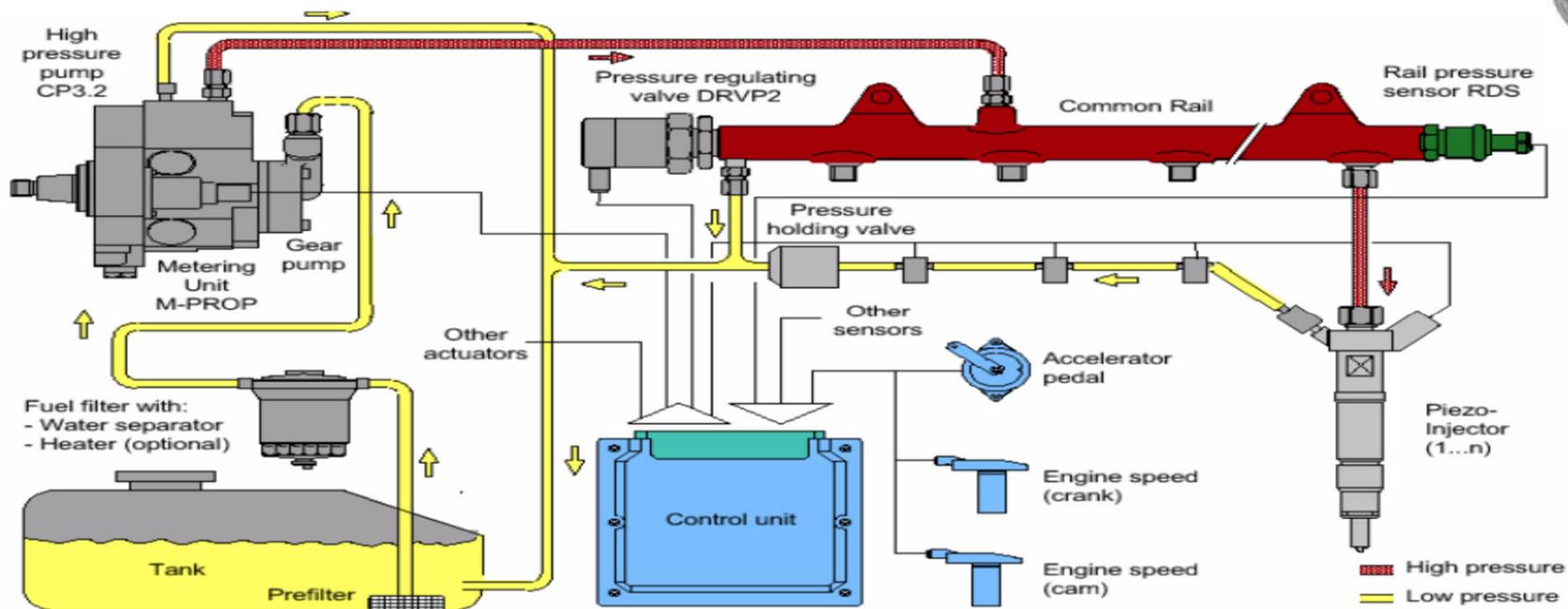
## Contrôle moteur

- Algorithmes
- Capteur, Actionneur, Calculateur

## Système d'injection Common Rail

### ● Principe de fonctionnement

- Accumulation du carburant sous haute pression dans un volume qui alimente les injecteurs



- **Multi-injection généralisée, les stratégies sont adaptées en fonction du point de fonctionnement**
  - Injection pilote ou double pilote
    - Réduction notable du bruit, réduction sensible HC-CO
  - After-injection
    - Réduction des fumées notamment
- **Développement de nouvelles technologies pour augmenter la pression d'injection maximale...**
  - Au delà de 3000 bar
- **...et améliorer le contrôle des quantités injectées**
  - Temps de réponse, sensibilité au phasage
  - Quantité minimale, séparation minimale entre 2 injections
  - Contrôle du taux d'introduction pour d'approcher du taux « idéal »

## Système d'alimentation en air (« boucle d'air »)

### ● Une boucle d'air est constituée

#### ● D'un ou plusieurs systèmes de suralimentation :

- turbocompresseur (TGF à waste-gate, TGV), compresseur (mécanique ou électrique...)
- Objectif : accroître la pression d'admission pour augmenter les performances ou accroître les capacités de dépollution

#### ● D'un ou plusieurs systèmes de recirculation des gaz d'échappement

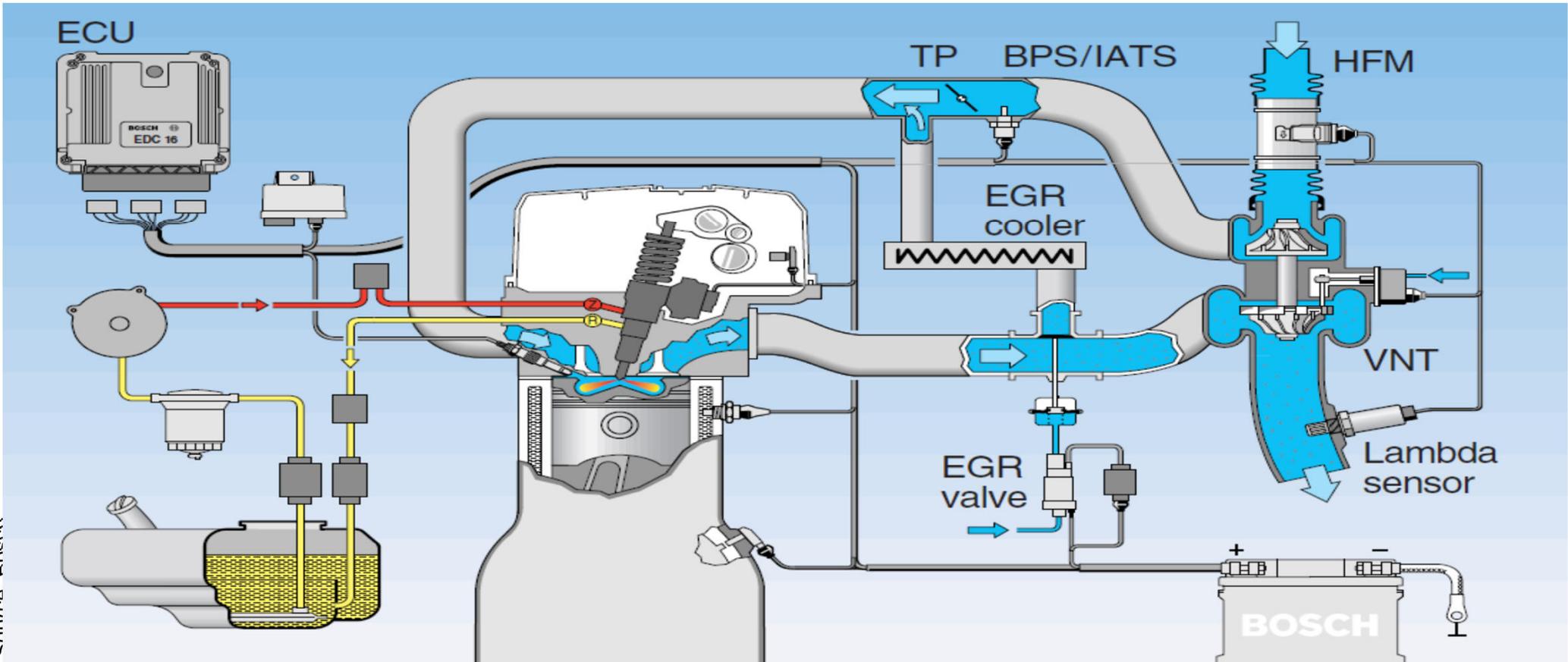
- Circuit EGR haute pression (HP) ou basse pression (BP)
- Objectif : réduire les émissions de NOx à la source

#### ● D'un ou plusieurs systèmes refroidissement

- Echangeurs air / air ou air / eau
- Objectif : réduire la température pour augmenter la densité d'air et favoriser le remplissage

# Système d'alimentation en air (« boucle d'air »)

SUSTAINABLE MOBILITY



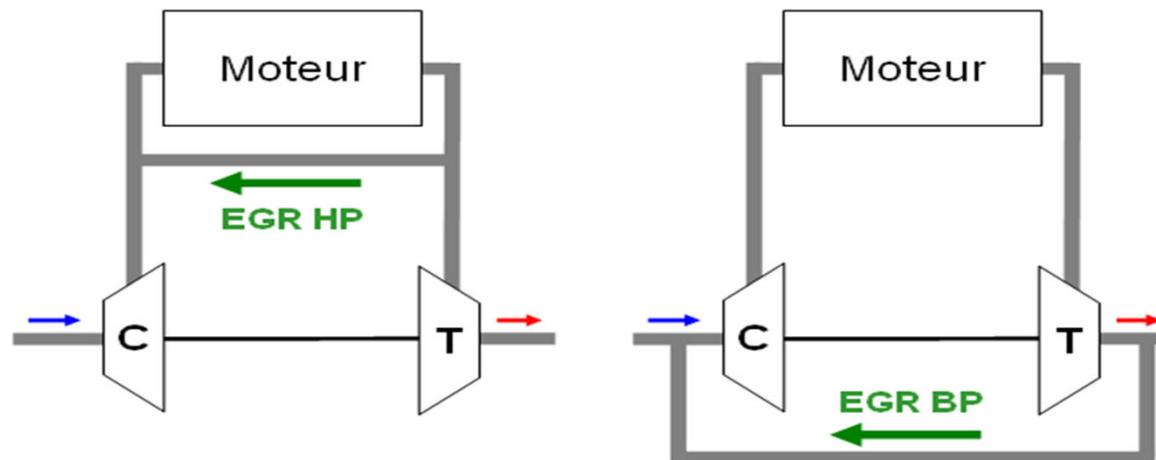
Source: Bosch

## La recirculation des gaz d'échappement (EGR)

- Les circuits EGR sont utilisés sur quasiment tous les moteurs Diesel actuels

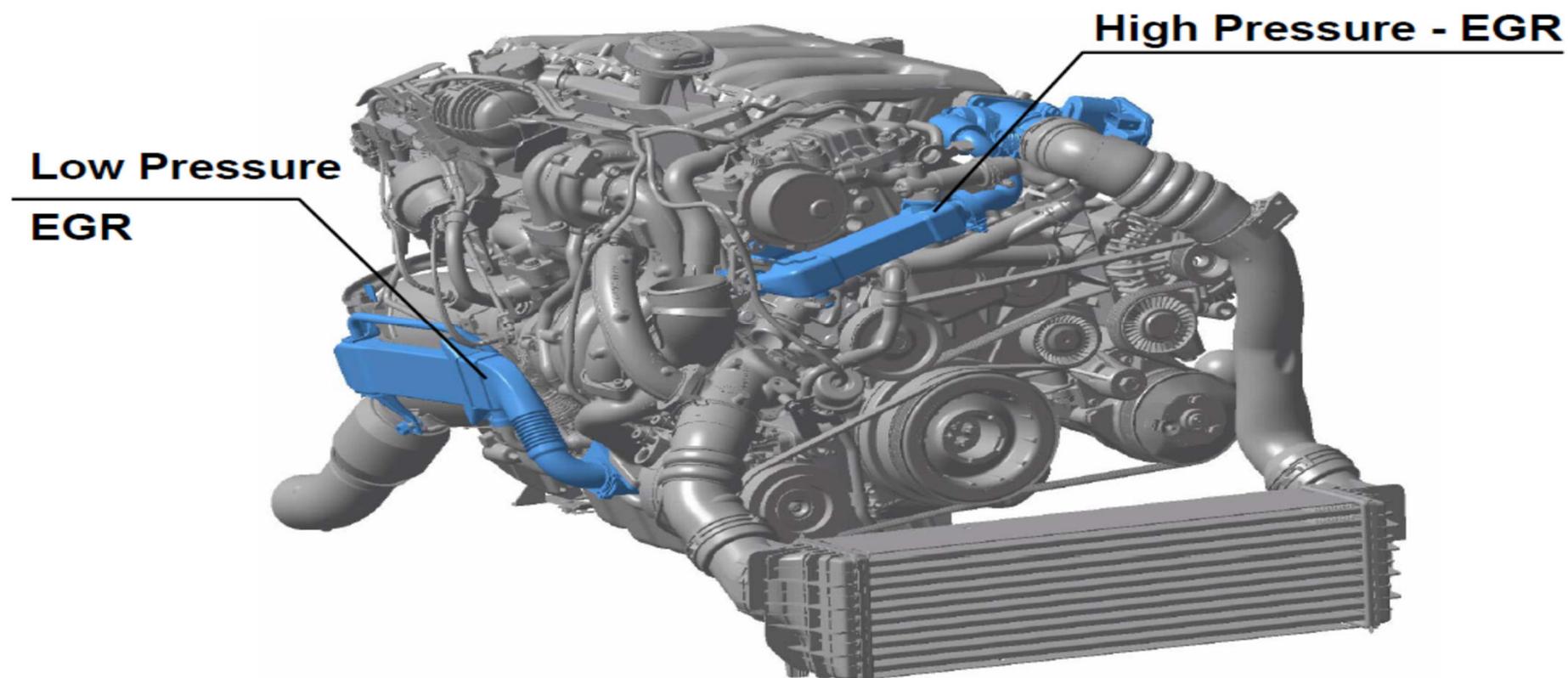
### ● Intérêts / inconvénients de l'EGR BP

- Intérêts: potentiel de remplissage (refroidissement), meilleure réponse en pression, encrassement et dispersions cylindre à cylindre réduits
- Inconvénients: augmentation du débit à post-traiter (chargement FAP plus rapide), moins bonne réponse en EGR, intégration complexe, risque d'endommagement du compresseur et d'oxydation des composants, pénalité en consommation en cas de vannage échappement



## La recirculation des gaz d'échappement (EGR)

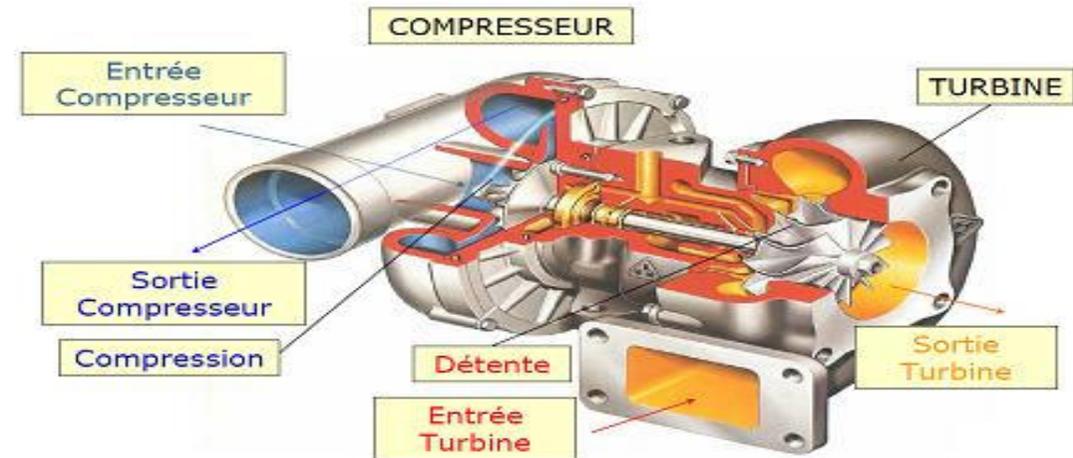
- La plupart du temps, les circuits EGR BP sont associés à un circuit EGR HP



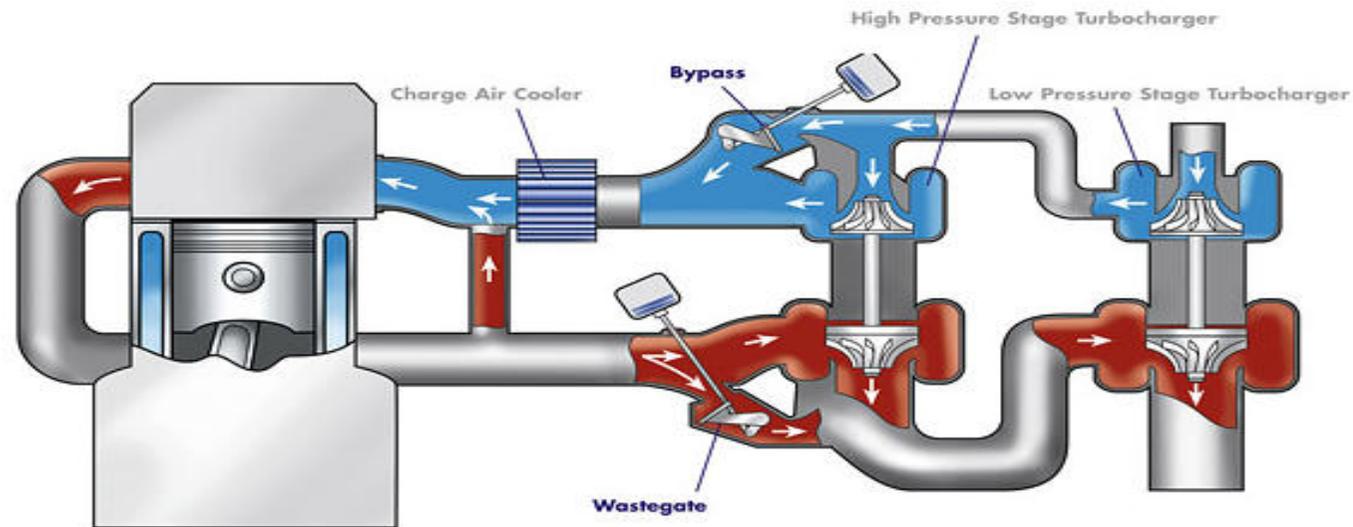
## La suralimentation

### ● Turbocompresseur généralisé depuis les moteurs à injection directe

- Turbine à géométrie fixe ou variable pour adapter l'inclinaison des aubes au débit d'échappement afin de récupérer le maximum d'énergie



### ● Système à double-suralimentation série



## Le post-traitement des émissions polluantes

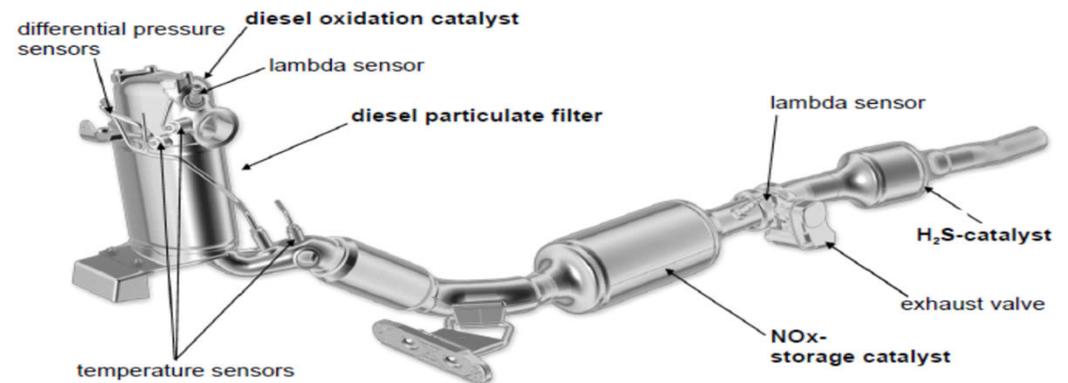
- Au contraire des moteurs à allumage commandés fonctionnant à la stoechiométrie, la catalyse 3 voies n'est pas applicable
  - Fonctionnement en mélange pauvre → milieu oxydant, réduction des NOx difficile

### ● Tous les polluants sont donc traités par un moyen de dépollution spécifique

- Catalyseur d'oxydation → HC et CO
- Filtre à particules
- Système SCR ou piège à NOx → NOx
- Catalyseurs complémentaires :
  - Stockeur de NOx (PNA)
  - Catalyseur H<sub>2</sub>S
  - Catalyseur d'oxydation de l'ammoniac

Source: Bosch

Et cela coûte de plus en plus cher !



source: Volkswagen

**Figure 2:** The exhaust system of the Volkswagen Jetta 2,0L TDI with Tier 2 Bin 5 application.

# Le post-traitement des émissions polluantes

## ● Le catalyseur d'oxydation (DOC)

- Fonctionnement comparable à un catalyseur 3 voies

## ● Le filtre à particules (DPF ou FAP)

- Chargement/régénération (~700km)
- Génère de la contre-pression échappement → Impact consommation

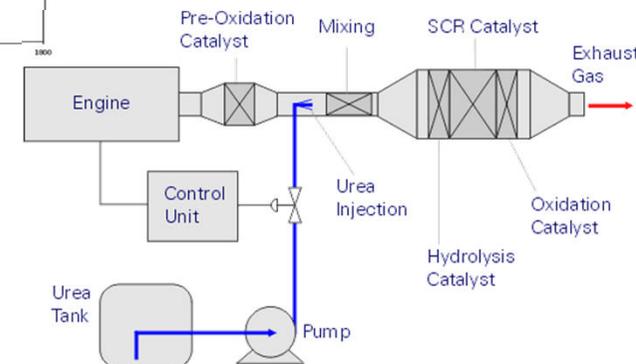
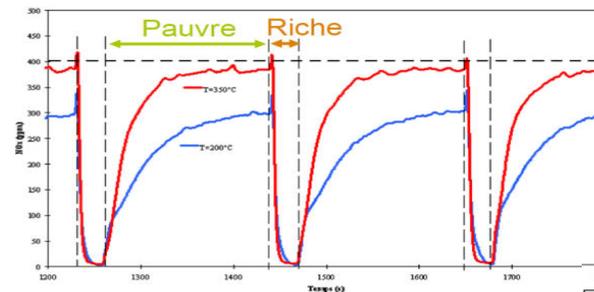
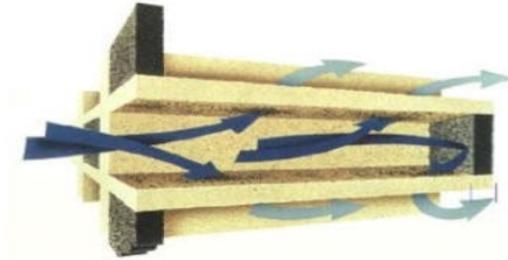
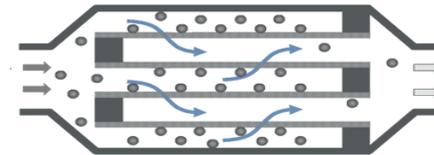
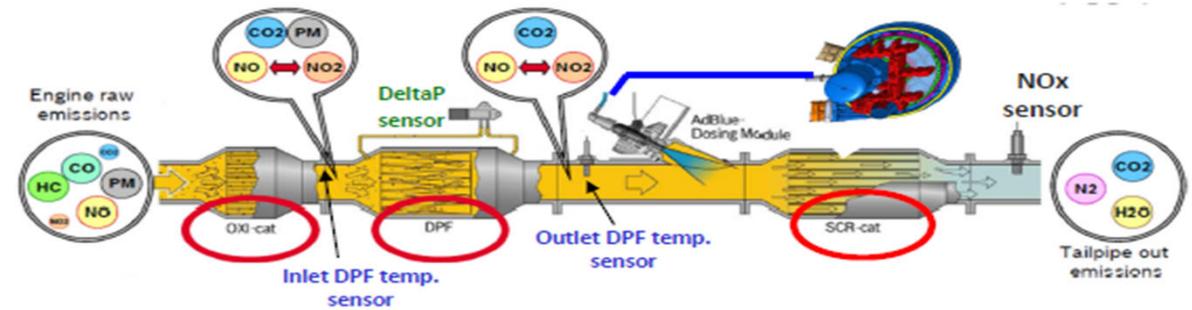
## ● Les systèmes DeNOx

### ● Lean NOx Trap (LNT)

- Phase de stockage (nitrate de baryum)
- Phase de régénération (~10km)

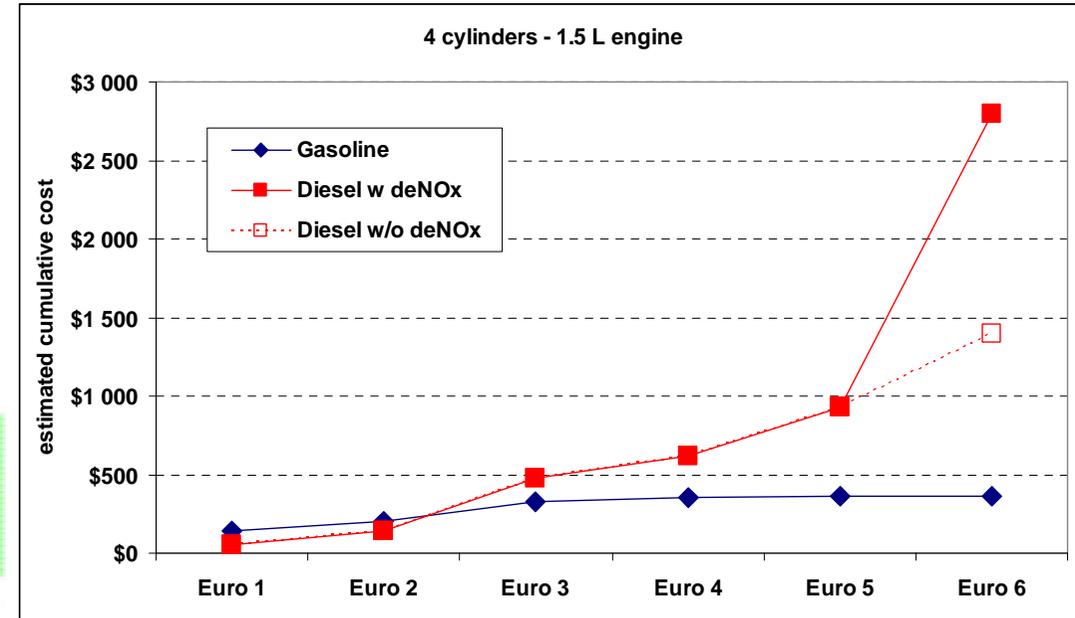
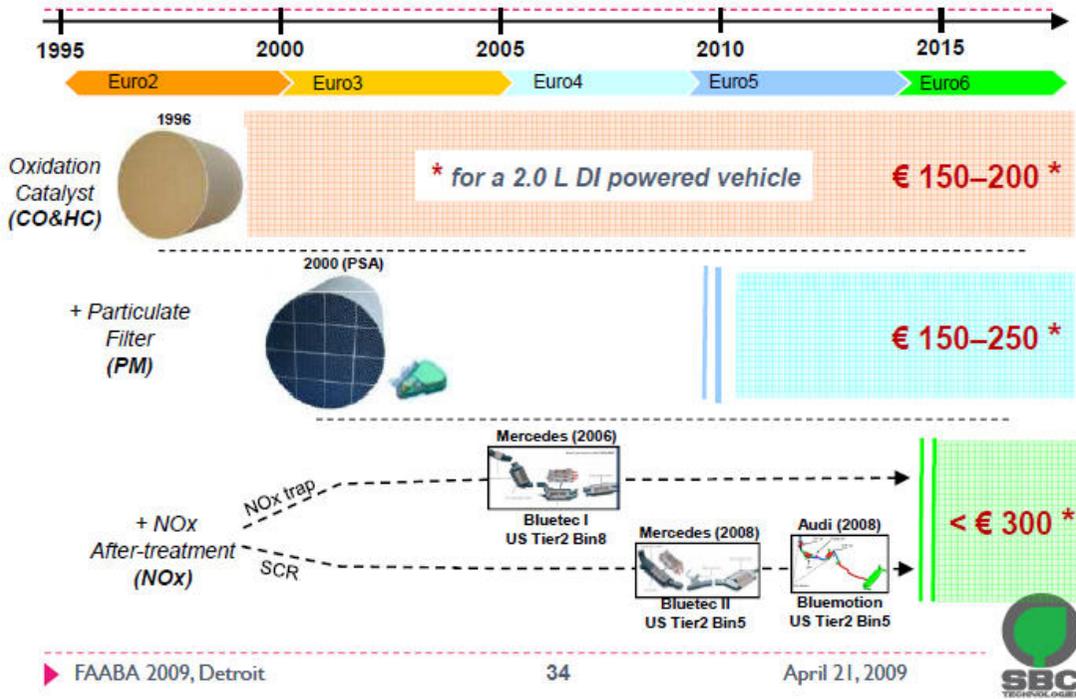
### ● Système SCR (réduction à l'urée)

- Phase de stockage (nitrate de baryum)
- Phase de régénération (~10km)

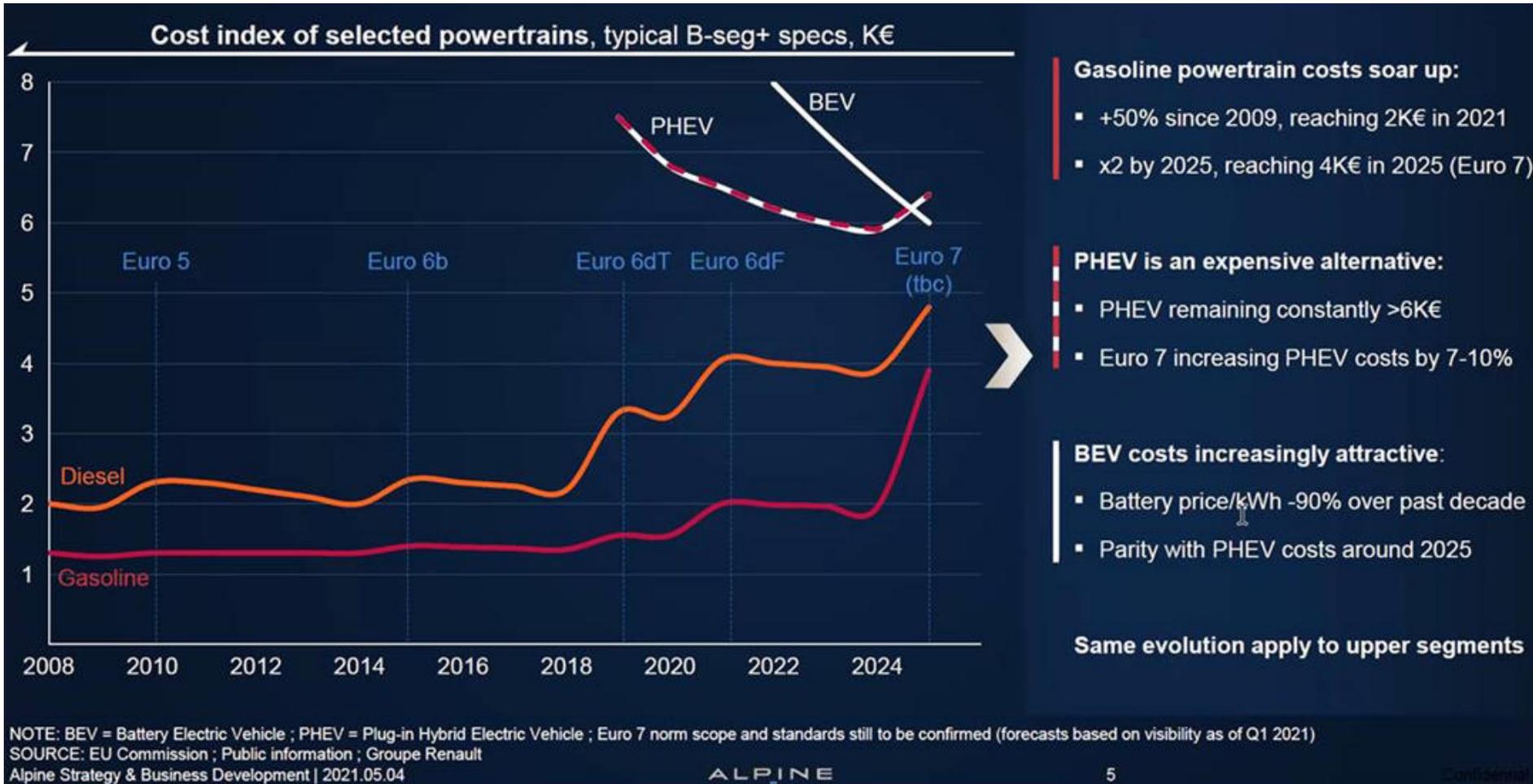


# Le post-traitement des émissions polluantes

## The Diesel after-treatmentS introduce additional costs



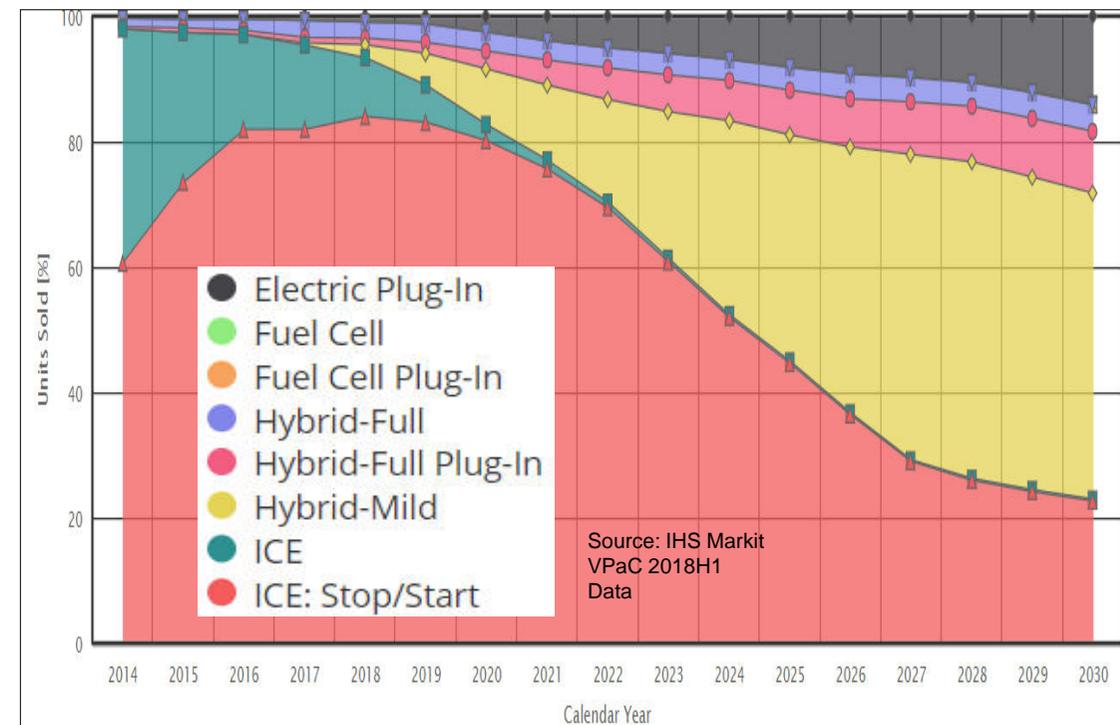
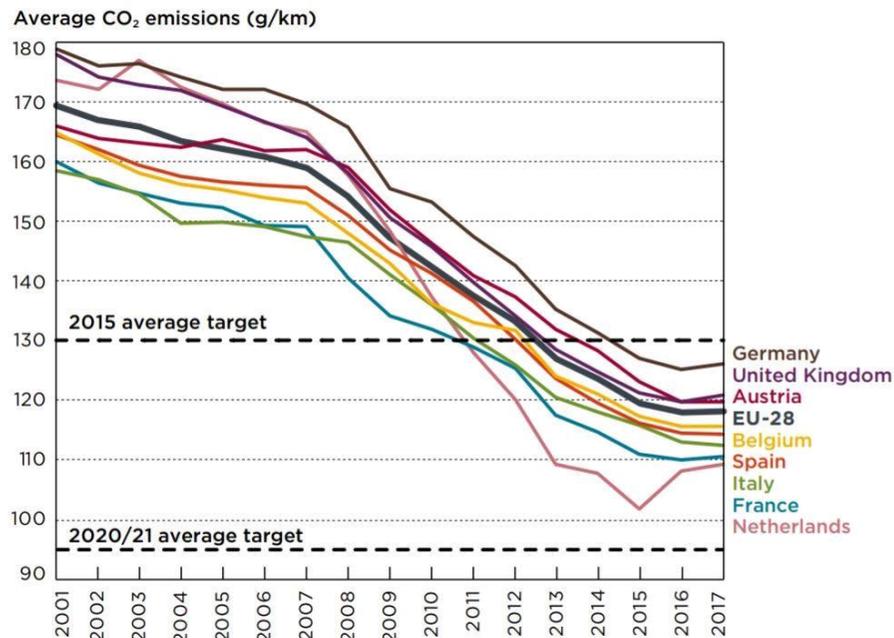
# Comparaison du coût des motorisations



- **Le moteur Diesel est actuellement l'une des solutions technologiques les plus abouties qui arrive à son asymptote**
  - En terme de rendement
  - En terme de coût admissible par le client
  
- **Le coût du système de dépollution est devenu un véritable problème qui exclue ce type de motorisation sur les petits véhicules (segments A et B)**
  
- **Les grands enjeux pour le futurs**
  - Réduire le coût du système de post-traitement
  - Accroître le rendement jusqu'à son asymptote
  - Redorer le blason du Diesel depuis le « Dieselgate »

## Synthèse

- Le véhicule moyen du futur conservera un moteur thermique (majoritairement essence) qui sera optimisé grâce à l'électrification !
- Le véhicule sera hybridé, a minima par un réseau de bord basse tension (48V), seule solution pour atteindre les futurs objectifs d'émissions de CO<sub>2</sub>...



*Innovating for energy*

Find us on:

 [www.ifpenergiesnouvelles.com](http://www.ifpenergiesnouvelles.com)

 @IFPENinnovation

