

Organisation de l'UEF « Energétique avancée » :

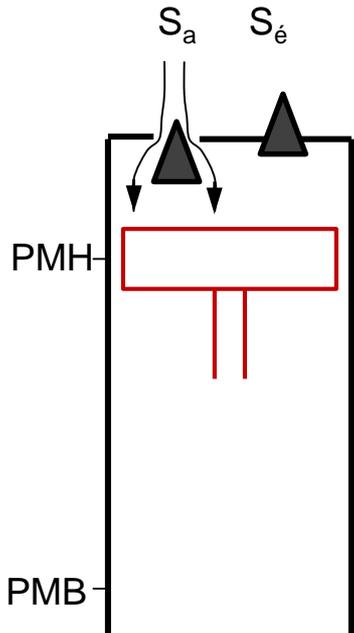
Partie **Machines thermiques** :

- Cycle thermodynamique de la climatisation
- **Principe de fonctionnement d'un moteur à combustion interne**
- **Cycles thermodynamiques des moteurs**
- Notions sur la combustion et la pollution
- Bilan carbone pour les carburants
- Bilan carbone pour une entreprise

1. Principe de fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps

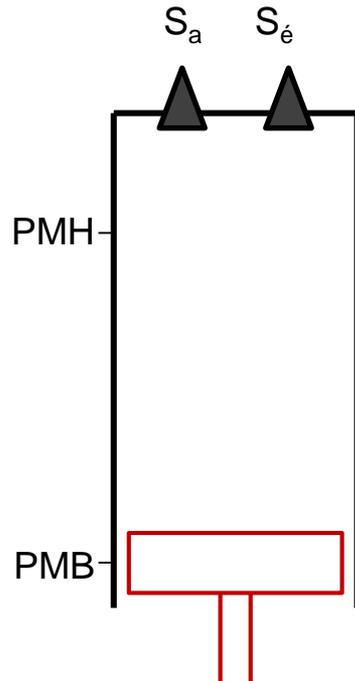
1^{er} temps :

Aspiration de l'air



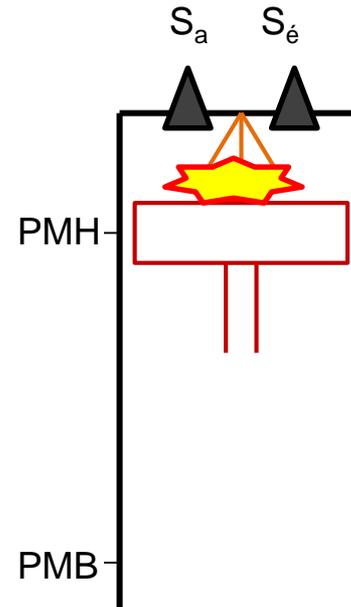
2^{ème} temps :

Compression de l'air

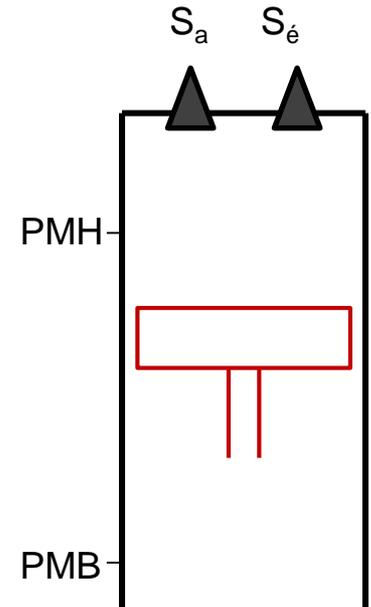


3^{ème} temps :

Injection du gazole au PMH, inflammation du gazole (dû à la température élevée de l'air) et combustion.



La combustion est finie.
Détente des gaz d'échappement.

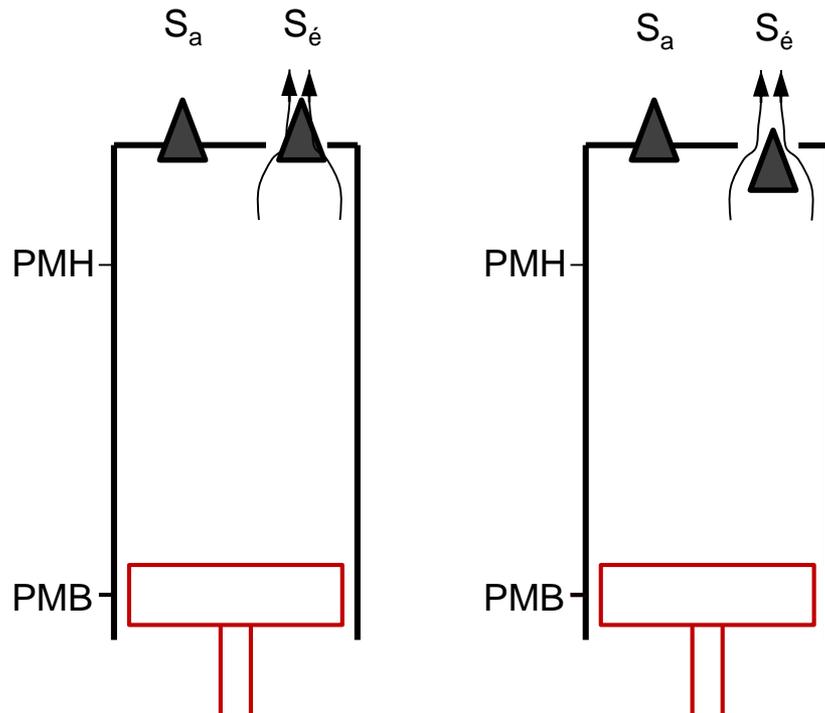


1. Principe de fonctionnement d'un moteur diesel à quatre temps

4^{ème} temps :

Ouverture de la soupape d'échappement.

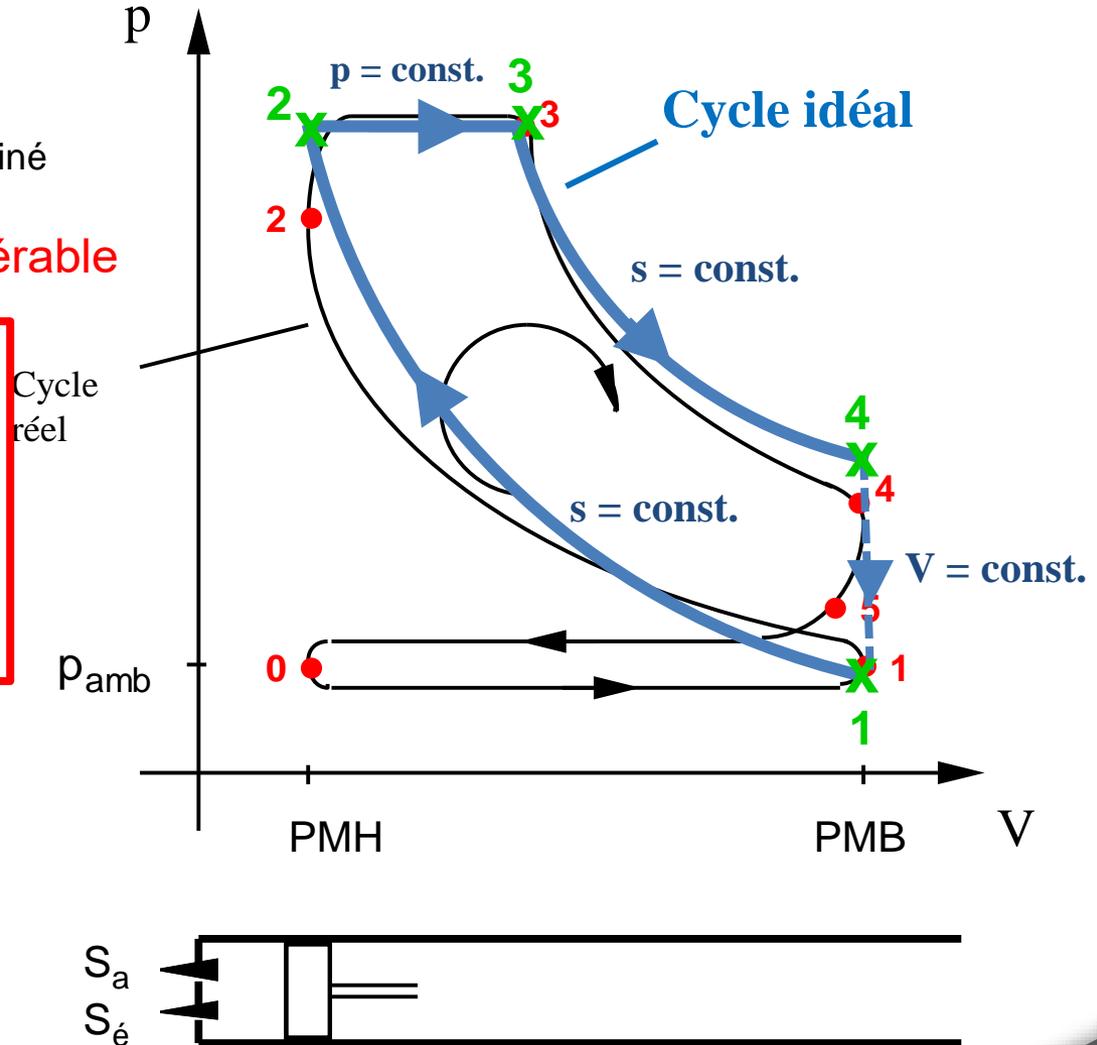
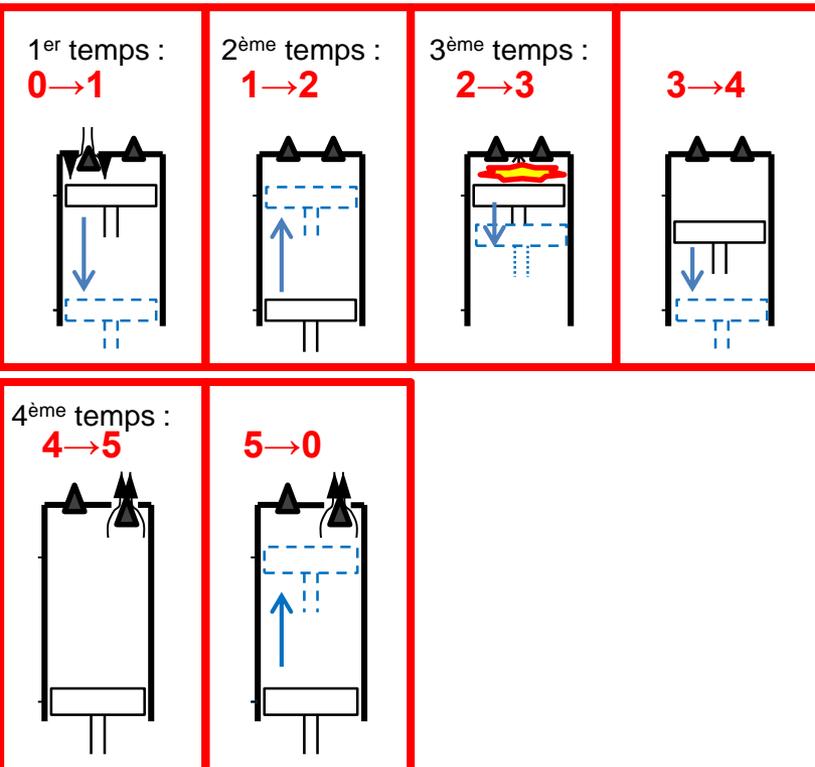
Refoulement des gaz d'échappement par le piston.



2. Cycle thermodynamique réel et idéal d'un moteur diesel

On utilise un diagramme p/V :

- **deux grandeurs facile à mesurer**
Le volume V peut être facilement déterminé si on connaît la position du piston.
- **surface du cycle \equiv travail récupérable**



2. Cycle thermodynamique réel et idéal d'un moteur diesel

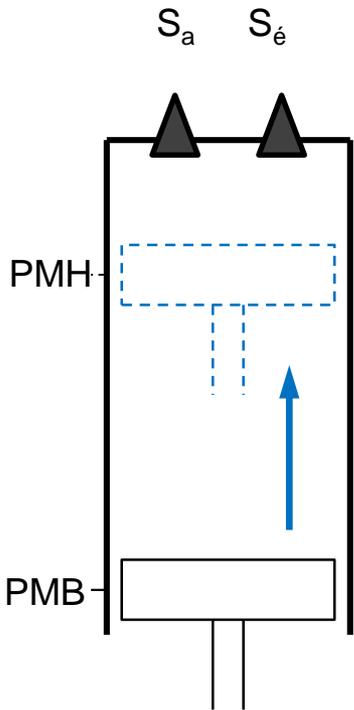
PPT appliqué au cycle idéal du moteur diesel: [TA: (1)]

Rappel : $Q_{e12} + W_{pV12} + \cancel{W_{112}} = U_2 - U_1$

[TA: (2)]
 $W_{pV12} = \int_1^2 p \, dV$

1 → 2:
 Compression adiabatique et réversible :

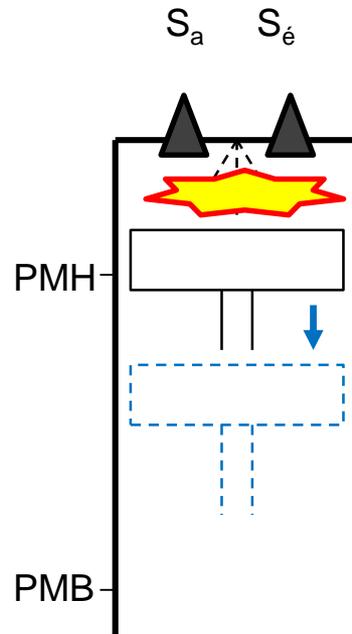
2 → 3:
 Combustion isobare du mélange air/gazole :



$W_{pV12} = U_2 - U_1$

$W_{pV12} = \frac{1}{\gamma - 1} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$

[TA: (31)]



$Q_{e23} + W_{pV23} = U_3 - U_2$

$W_{pV23} = -p(V_3 - V_2)$

2. Cycle thermodynamique réel et idéal d'un moteur diesel

PPT appliqué au cycle idéal du moteur diesel :

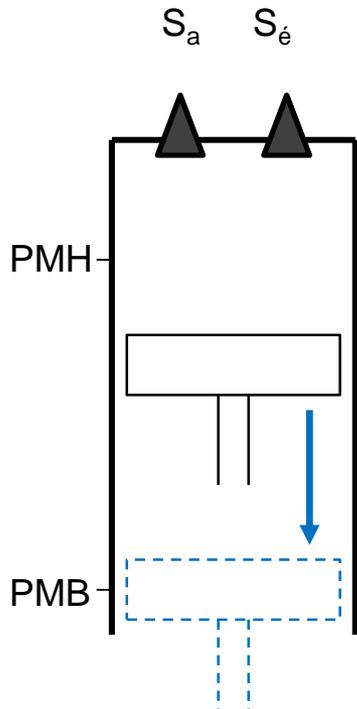
Rappel : $Q_{e12} + W_{pV12} + \cancel{W_{112}} = U_2 - U_1$

$$W_{pV12} = \int_1^2 p \, dV$$

3 → 4:
Détente adiabatique et réversible des gaz d'échappement

$= 0$

(4 → 1:
Enlèvement de la chaleur à V = const.)



$$W_{pV34} = U_4 - U_3$$

$$W_{pV34} = \frac{1}{\gamma - 1} (p_4 V_4 - p_3 V_3)$$

$$Q_{e41} = U_1 - U_4$$

3. Le rendement d'un moteur diesel

PPT appliqué au cycle idéal du moteur diesel :

$$1 \rightarrow 2: W_{pV12} = U_2 - U_1$$

$$2 \rightarrow 3: Q_{e23} + W_{pV23} = U_3 - U_2$$

$$3 \rightarrow 4: W_{pV34} = U_4 - U_3$$

$$4 \rightarrow 1: Q_{e41} = U_1 - U_4$$

$$W_{pV23} = -p(V_3 - V_2)$$

$$\eta_{th} = \frac{-W_{pV \text{ récupéré}}}{Q_{intro}} = \frac{-\sum W_{pVj,j+1}}{Q_{e23}} = \frac{Q_{e23} + Q_{e41}}{Q_{e23}} \quad \text{[TA: (36)]}$$

$$= 1 + \frac{Q_{e41}}{Q_{e23}} = 1 + \frac{U_1 - U_4}{U_3 - U_2 + p^*(V_3 - V_2)} = 1 + \frac{U_1 - U_4}{H_3 - H_2} = 1 + \frac{m^*c_V^*(T_1 - T_4)}{m^*c_p^*(T_3 - T_2)} \quad \text{[TA: (9)]} \quad \text{[TA: (5)]}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad \text{[TA: (14)]}$$

[TA: (29)]

(1.1)

3. Le rendement d'un moteur diesel

Reprenons la formule pour le rendement thermique :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)^{\frac{1}{\gamma}} T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)^{\frac{1}{\gamma}} T_2}$$

On définit

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}}$$

et

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_{\text{fin de la combustion}}}{V_{\text{debut de la combustion}}}$$

Rappel :

Equation d'état du gaz parfait [TA: (28)] :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

- isentropique : $k = \gamma$

- isobare : $k = 0$

Pour la transformation isentropique $1 \rightarrow 2$:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \quad (1.2)$$

Pour la transformation isobare $2 \rightarrow 3$:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \varphi \quad (1.3)$$

3. Le rendement d'un moteur diesel

Reprenons la formule pour le rendement thermique :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) * T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) * T_2}$$

On définit

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}}$$

et

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_{\text{fin de la combustion}}}{V_{\text{debut de la combustion}}}$$

Rappel :

Equation d'état du gaz parfait [TA: (28)] :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

- isentropique : $k = \gamma$

- isochore : $k = \infty$

On obtient pour le rapport T_4/T_1 :

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1}}{T_2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}} = \varphi * \frac{\left(\frac{V_3}{V_1}\right)^{\gamma-1}}{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}} = \varphi * \frac{\left(\frac{V_3 * \cancel{V_2}}{V_2 * \cancel{V_1}}\right)^{\gamma-1}}{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}} = \varphi \cdot \varphi^{\gamma-1} = \varphi^\gamma \quad (1.4)$$

3. Le rendement d'un moteur diesel

Reprenons la formule pour le rendement thermique :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right) * T_1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) * T_2}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \varphi^\gamma$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \varphi$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

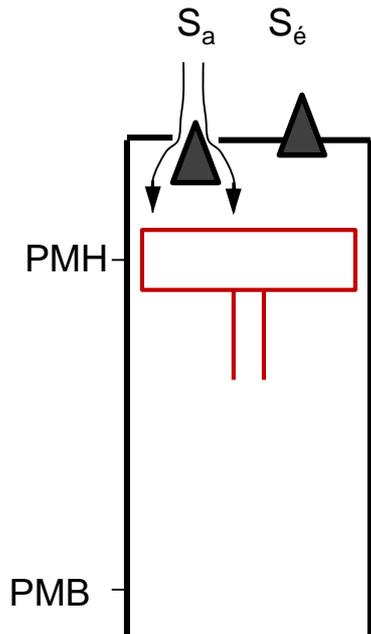
On obtient finalement pour le rendement thermique :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\varphi^\gamma - 1}{\varphi - 1} * \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

4. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps

1^{er} temps :

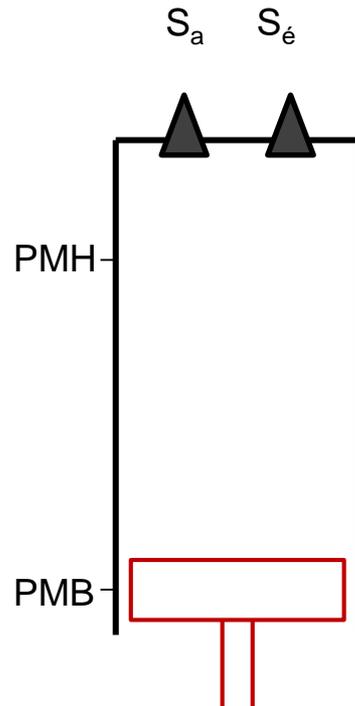
Aspiration du mélange air/essence



2^{ème} temps :

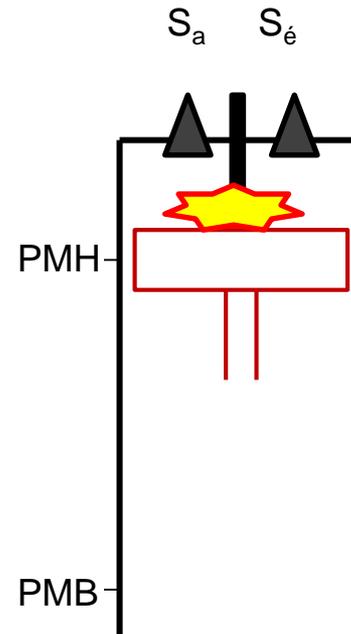
Compression du mélange air/essence

$$\frac{V_1}{V_2} = 10 \quad p_2 = 22 \text{ bar}$$

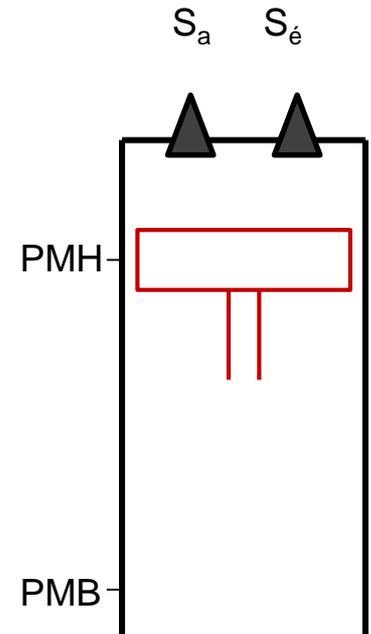


3^{ème} temps :

Inflammation du mélange air/essence à l'aide d'une étincelle de la bougie d'allumage et combustion presque instantanée



Détente des gaz d'échappement.

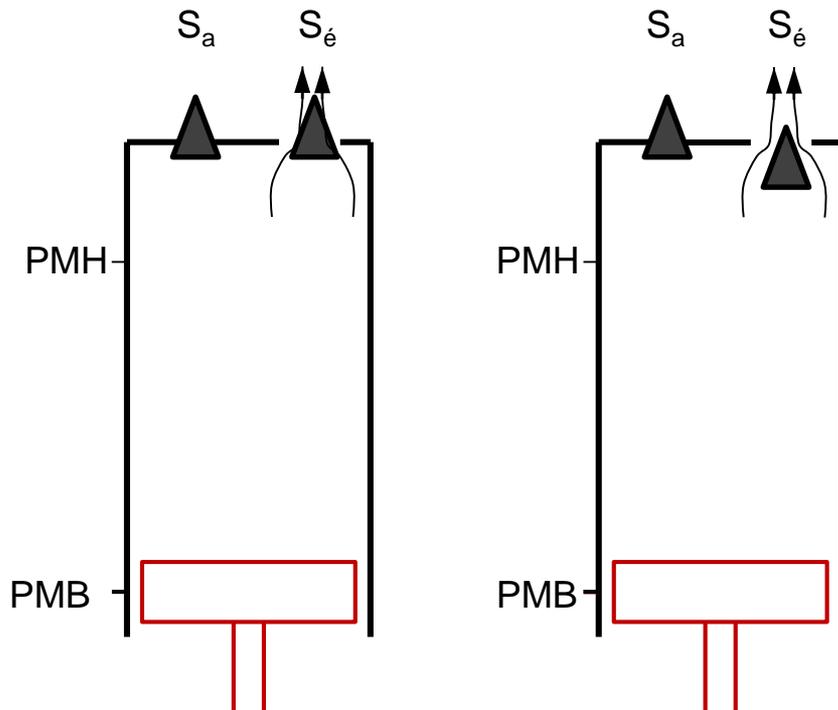


4. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps

4^{ème} temps :

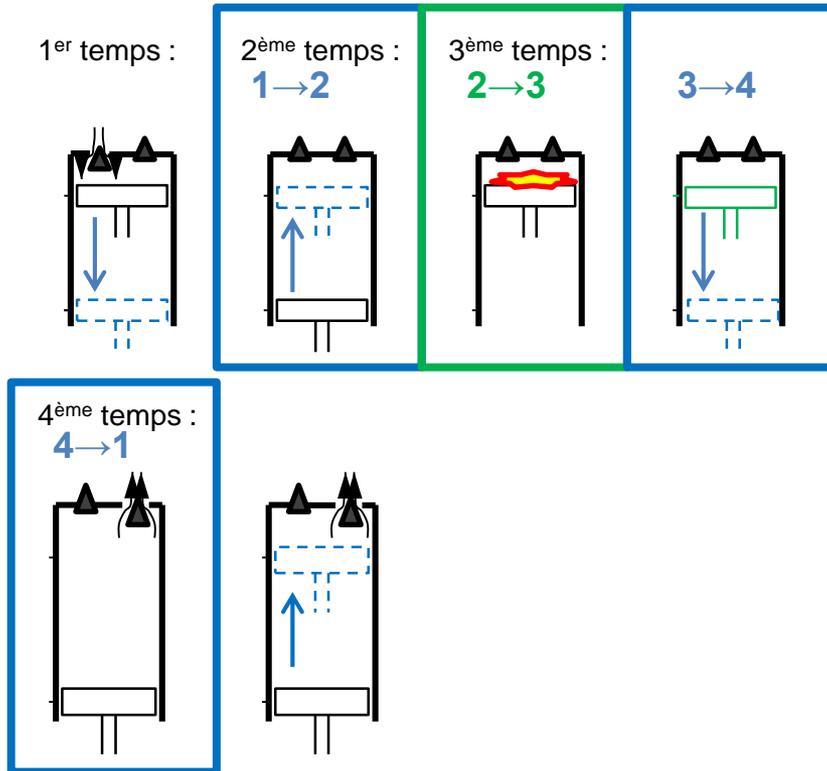
Ouverture de la soupape d'échappement.

Refoulement des gaz d'échappement par le piston.

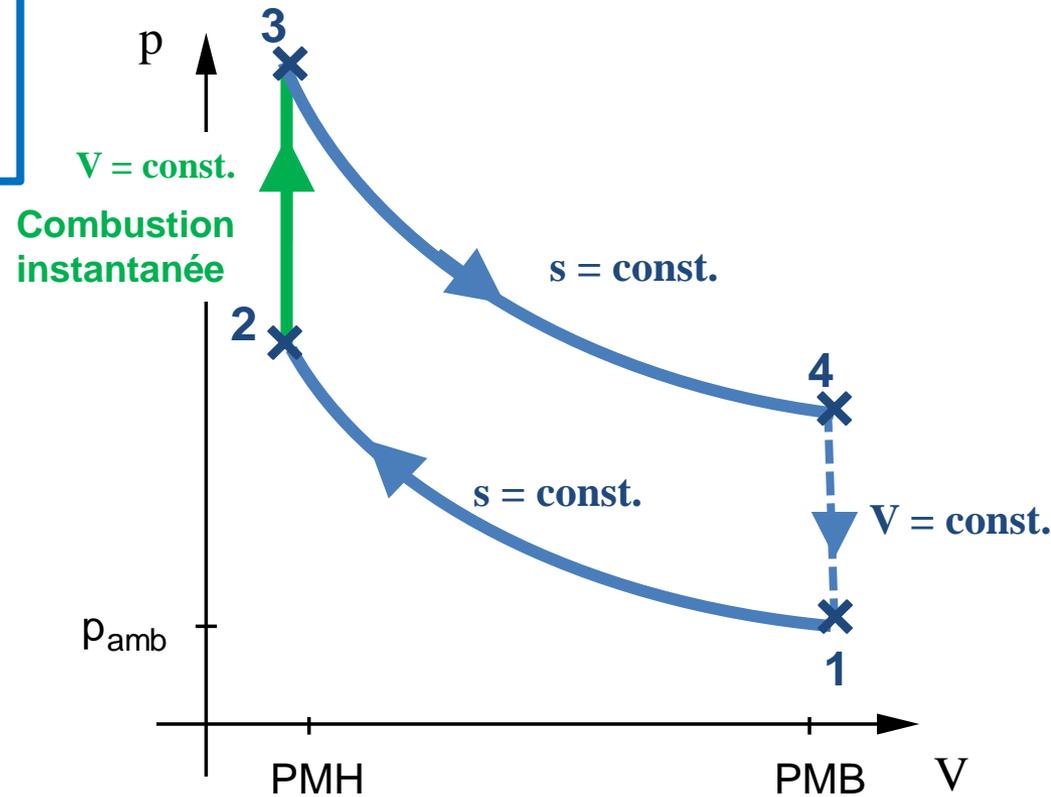


Moteur en mouvement

4. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps



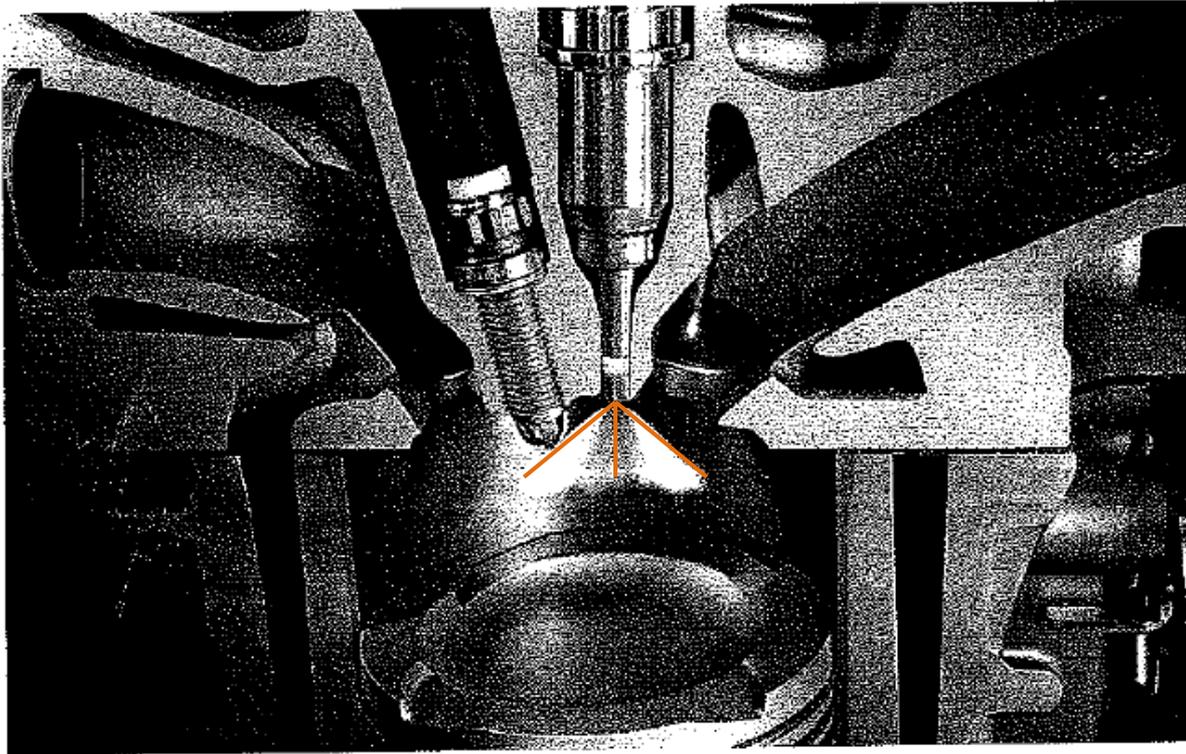
Cycle idéal :



4. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps

Nouveautés concernant le moteur à essence :

Moteur HPi (ou FSI) : * Moteur à **H**aute **P**ression et injection directe, aussi appelé moteur à injection directe GDI ou moteur à charge stratifiée
* sur le marché depuis 2001 (Citroën C5 et Peugeot 406)



* Aspiration **de l'air** ,
injection directe de l'essence dans la chambre de combustion
pendant la deuxième moitié de la compression, le nuage d'essence touche la bougie d'allumage et est allumé par une étincelle de la bougie

4. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps

Nouveautés concernant le moteur à essence :

Moteur CAI : Autoallumage préréglé (CAI : **C**ontrolled **A**uto**I**gnition ou GCI)

- * premiers prototypes (Daimler, Volkswagen, Opel) : CAI entre 1000 et 3500 tours/min (en dehors : moteur à essence classique)
- * injection dans la chambre de combustion à la fin de l'aspiration ; inflammation du mélange air/essence dans le cylindre par compression (30 bar) ; on n'a plus besoin des bougies d'allumage
- * Avantages : combustion quasiment instantanée = 20 % moins de consommation (en ville), jusqu'à 99 % moins de NOx, moins de CO
- * Difficulté : enflammer le mélange air/essence au bon moment (obtenir 30 bar un peu avant le point mort haut)

Moteur RCCI : fonctionne comme un moteur CAI, mais la « pression critique de l'explosion du mélange air/essence » est atteinte par la combustion d'une petite quantité de gazole injecté un peu avant le PMH.

4. Principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps

Nouveautés concernant le moteur à essence :

Moteur SPCCI : SPCCI : **SP**ark **C**ontrolled **C**ompression **I**gnition (Mazda 3 Skyactiv-X, commercialisé en 2019)

- fonctionne comme un moteur CAI, mais la « pression critique de l'explosion du mélange air/essence » est atteinte par l'allumage par une bougie d'une petite quantité d'essence injecté un peu avant le PMH.

Ce moteur émet beaucoup moins de CO₂ qu'une voiture d'essence, mais un peu plus qu'une voiture diesel.

5. Comparaison entre un moteur diesel et un moteur essence

	Moteur diesel	Moteur à essence
Inflammation	Le gazole s'enflamme au fur et à mesure qu'il est injecté dans l'air comprimé et chaud du cylindre.	Avant que l'inflammation commence le mélange air/essence est déjà dans le cylindre. L'inflammation de l'essence est instantanée à l'aide de l'étincelle de la bougie d'allumage. (ou par compression du mélange air/essence (moteur CAI)).
Rapport volumétrique	16	10 (CAI : 12)
Rendement effectif (à l'arbre de sortie du moteur)	0,28 – 0,46	0,22 – 0,32

Comparaison entre un moteur diesel et un moteur essence

La différence concerne la facilité avec laquelle le carburant s'évapore .

- Dans le **moteur à essence** le carburant est mélangé avec de l'air avant d'entrer dans le cylindre. On a besoin d'un carburant qui s'évapore et se mélange rapidement avec l'air : **l'essence**.
- Dans le **moteur diesel** le carburant est injecté dans le cylindre. On a besoin d'un carburant qui ne s'évapore pas trop vite (autrement le carburant brûle près de l'orifice de l'injecteur) et pas trop lentement (autrement du carburant liquide se dépose sur les parois du cylindre) : **le gazole**.

6. Moteur à quatre cylindres

La figure au dessus montre un moteur à quatre cylindres. Chaque cylindre se trouve dans un autre temps :

- le 1^{er} piston de droite commence à aspirer le mélange air/essence (1^{er} temps)
- le 2^{ème} piston de droite commence à comprimer le mélange air/essence (2^{ème} temps)
- le 4^{ème} piston de droite commence à détendre les gaz d'échappement. (3^{ème} temps)
- le 3^{ème} piston de droite commence à refouler les gaz d'échappement. (4^{ème} temps)

C'est donc seulement le 4^{ème} piston qui fournit un travail entraînant le vilebrequin, l'arbre à cames et les trois autres cylindres qui consomment du travail pour aspirer, comprimer et refouler le gaz.

