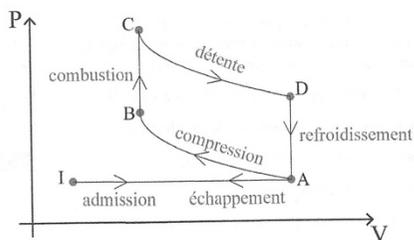


## ► Correction : Moteur automobile

1. Le diagramme P,V du fonctionnement du moteur essence (cycle de Beau de Rochas) est :



Les quatre temps de cette machine sont l'**admission**, la **compression**, la **combustion** et l'**échappement**.

## ⊕ Petit plus

Il existe également des **moteurs deux-temps**. Ils sont plus **performants** et plus **nerveux** qu'un moteur 4 temps mais sont également plus **fragiles** et consomment plus d'essence et d'huile.

Les deux phases sont :

- **compression** dans le haut-moteur et **admission** dans le bas-moteur
- **échappement** dans le haut moteur et **détente** dans le bas-moteur.

2. Le mélange air-essence est considéré comme un **mélange de gaz parfaits**. On peut donc écrire :

$$P_A V_A = (n_e + n_{air}) RT_A \Rightarrow n_e + n_{air} = \frac{P_A V_A}{RT_A}$$

■ **A.N.** :  $n_e + n_{air} = 4 \times 10^{-2}$  mol, or on sait que le moteur reçoit  $n_e = 2 \times 10^{-2}$  mol mol d'essence à l'admission, d'où  $n_{air} = 2 \times 10^{-2}$  mol.

## ⊕ Petit plus

L'admission est réalisée par un carburateur, ou plus couramment par un **système d'injection électronique**. Le rapport air/carburant doit être 1/14 pour être dans les proportions **stoechiométriques**.

3. On s'intéresse à la phase de compression  $A \rightarrow B$ . Il s'agit d'une transformation **adiabatique** et **réversible**, on peut donc utiliser la **loi de Laplace** pour un gaz parfait :

$$PV^\gamma = \text{cste} \Rightarrow P_B = P_A \cdot \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^\gamma$$

■ **A.N.** : On trouve  $P_B = 16.22$  bar.

On considère que même compressé, le gaz se comporte toujours comme un gaz parfait. On a alors :

$$P_B V_B = n_B R T_B \Rightarrow T_B = \frac{P_B V_B}{n_A R}$$

■ **A.N.** : On trouve  $T_B = 609$  K.

4. Cette fois, on cherche un lien entre la **température** et le **volume** lors de la phase de **compression**  $A \rightarrow B$ . On utilise à nouveau une des **formules de Laplace** pour les gaz parfaits :

$$TV^{\gamma-1} = \text{cste} \\ \Rightarrow \tau = \frac{V_A}{V_B} = \left(\frac{T_B}{T_A}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

■ **A.N.** :  $\tau = 8.6$

Le taux de compression est fixé à 8 par l'énoncé. On est donc proche de la limite d'auto-combustion, tout en conservant une certaine marge de sécurité.

## ⊕ Petit plus

Le **moteur diesel** utilise l'**auto-combustion**, il présente un meilleur **rendement** (environ 40%) et à tendance à être plus **robuste**. Cependant, celui-ci est plus lourd et offre moins de souplesse, c'est-à-dire que la plage de vitesse de rotation à rendement maximal est relativement **étroite**.

5. On s'intéresse maintenant à la phase de combustion  $B \rightarrow C$ . Celle-ci est isochore, donc  $V_B = V_C = \frac{V_A}{8}$ . La loi des gaz parfaits au point C donne :

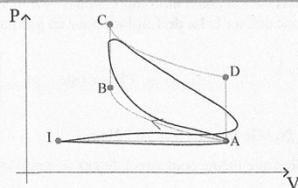
$$P_C V_C = n_A R T_C \Rightarrow P_C = \frac{n_A R T_C}{V_C}$$

■ **A.N.** :  $P_C = 55$  bar : la condition n'est **pas respectée**, il y a un risque d'**explosion** de la culasse.

## ⊕ Petit plus

La combustion n'est pas **instantanée**, ce qui permet d'éviter que la pression soit trop forte.

Les hypothèses de **réversibilité adiabatique** et de **gaz parfait** sont également très **discutables** (d'autant que le mélange est amené à forte pression). L'allure du cycle réel est donné ci contre.



6. L'expression du **rendement** est  $\eta = \frac{-W_{\text{cycle}}}{Q_{BC}}$ . En effet, on souhaite récupérer le travail mécanique que produit le moteur, et on dépense le carburant nécessaire à la combustion.

**Travail du cycle**

On commence par calculer le **travail** généré par le cycle thermodynamique :

—  $A \rightarrow B$  : **Compression adiabatique réversible**. Sachant que  $C_{v,m} = \frac{R}{\gamma-1}$ , le premier principe donne :

$$\Delta U_{AB} = W_{AB} = n_A C_{v,m} (T_B - T_A)$$

—  $B \rightarrow C$  : **Combustion isochore**, il n'y a donc **pas de travail** :

$$W_{BC} = 0$$

—  $C \rightarrow D$  : **Détente adiabatique réversible**. Sachant que  $T_D = T_C \left(\frac{V_C}{V_D}\right)^{\gamma-1} = 1035 \text{ K}$ , le premier principe donne :

$$U_{CD} = W_{CD} = n_A C_{v,m} (T_D - T_C)$$

—  $D \rightarrow A$  : **Refroidissement isochore**, il n'y a donc **pas de travail** des forces de pression :

$$W_{DA} = 0$$

Finalement, le travail fourni au système est :

$$W_{\text{cycle}} = n_A C_{v,m} (T_B - T_A + T_D - T_C)$$

■ **A.N.** :  $W_{\text{cycle}} = -732 \text{ J} < 0$  car il s'agit d'une énergie transmise **du système vers l'extérieur**.

**Transfert thermique combustion**

La transformation est isochore. On applique donc le premier principe de la thermodynamique entre  $B$  et  $C$  :

$$\Delta U_{BC} = Q_{BC} = n_A C_{v,m} (T_C - T_B)$$

■ **A.N.** :  $Q_{BC} = 1458 \text{ J}$

**Calcul du rendement**

On peut maintenant calculer le rendement :

$$\eta = -\frac{W_{\text{cycle}}}{Q_{BC}}$$

■ **A.N.** :  $\eta = 50\%$

**Calcul de la puissance**

Le moteur délivre  $W_{\text{cycle}} = 732 \text{ J}$  par tour, or il tourne à  $N = 3500 \text{ tr/min}$ , soit une puissance :

$$P = W_{\text{cycle}} \frac{N_{\text{moteur}}}{60}$$

■ **A.N.** : On rappelle que  $1 \text{ ch} = 735 \text{ W}$ . On trouve  $P = 42.7 \text{ kW} = 58 \text{ ch}$ , ce qui est cohérent avec une utilisation automobile : c'est environ la puissance d'une petite citadine.

## ⊕ Petit plus

Un **moteur à explosion** pour voiture ne peut pas être optimisé pour fonctionner à une puissance précise, puisqu'on lui demande de fonctionner sur une **large** plage de vitesse et de couple. Le **rendement** ne dépasse donc que difficilement les 30%. C'est pourquoi des véhicules **hybride série** ont vu le jour : la **propulsion est assurée par un moteur électrique** de haut rendement (>95%), alimenté par un groupe électrogène entraîné par un **moteur thermique optimisé** qui fonctionne toujours à son point de rendement maximal.

7. On s'intéresse enfin à la phase de refroidissement isobare  $D \rightarrow A$ . La transformation est isochore soit :

$$dU = \delta Q = n_A C_{v,m} dT$$

Dans le cas d'une **transformation réversible**, on a  $dS = \frac{\delta Q}{T} = n_A C_{v,m} \frac{dT}{T}$ . En intégrant, on trouve :

$$\Delta S = n_A \frac{R}{\gamma-1} \ln \left( \frac{T_A}{T_D} \right)$$

## ℵ Pour mémoire

L'entropie est une **fonction d'état**, ce qui signifie que la différence d'entropie entre un état final et un état initial **ne dépend pas du chemin suivi** par la transformation. En particulier, on peut considérer le chemin **réversible** pour le calcul : le résultat de l'intégrale sera **le même** que celui prenant en compte l'irréversibilité. En revanche, la répartition de  $S_{\text{échangée}}$  et  $S_{\text{créée}}$  sera différente. Cela est dû au fait que  $\delta S_{\text{échangée}}$  et  $\delta S_{\text{créée}}$  ne sont pas des **différentielles exactes** !

Or, l'entropie échangée est donnée par  $S_{\text{échangée}} = \frac{Q_{DA}}{T_A} = n_A C_{v,m} \left(1 - \frac{T_D}{T_A}\right)$ . Ainsi  $S_{\text{créée}} = \Delta S - S_{\text{échangée}}$

■ **A.N.** :  $S_{\text{créée}} = 1.24 \text{ J K}^{-1} > 0$  : le fonctionnement réel est **irréversible**.