

Lycée Baimbridge, MP 2026-2027

à rendre pour le 8 octobre 2026

Physique Chimie

DM 6

Etude thermodynamique du moteur automobile (E3A PSI 2004)

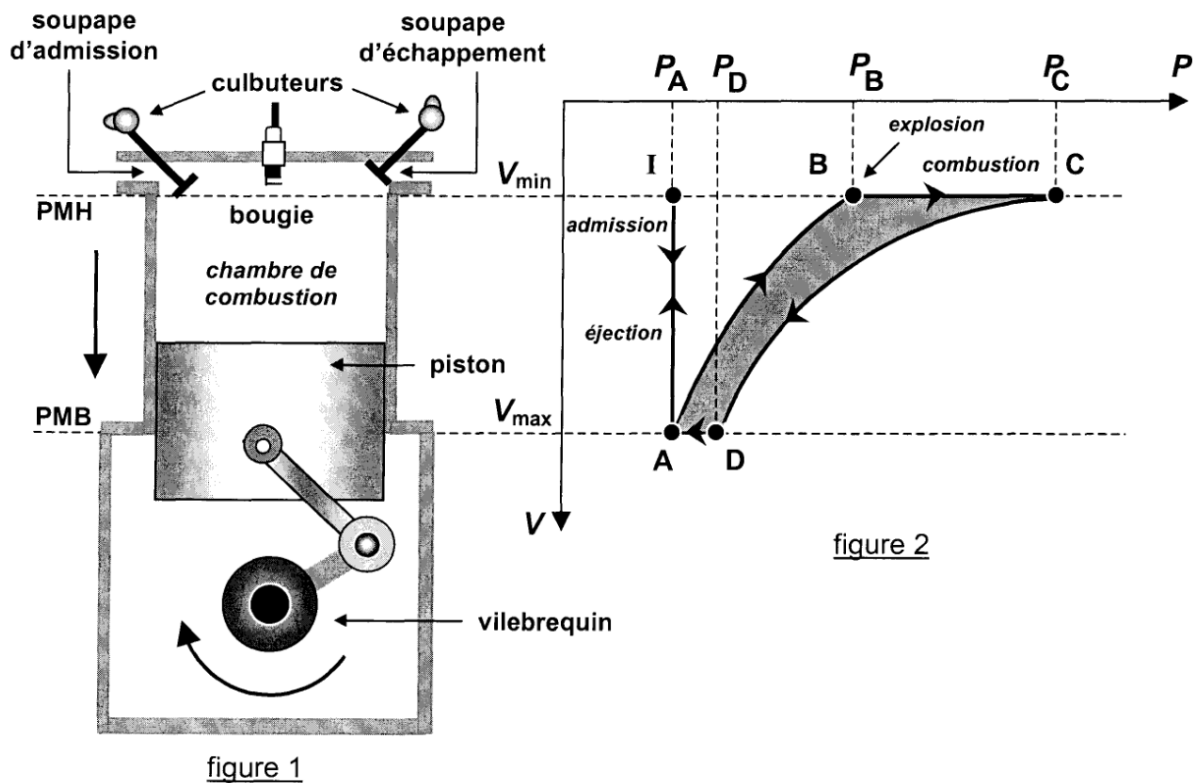
Ce problème illustre le fonctionnement d'un moteur automobile. Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange air-carburant : les moteurs à allumage commandé (moteurs à essence) et les moteurs à allumage par compression (moteurs diesel). Ce sont tous les deux des moteurs à combustion interne, car la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur.

Le moteur contient en général plusieurs cylindres. Dans le cas des moteurs à allumage commandé, un mélange convenable air-essence obtenu à l'aide d'un carburateur est admis dans la chambre de combustion du cylindre. L'allumage y est provoqué par une étincelle éclatant entre les deux électrodes d'une bougie.

Dans chaque cylindre, le piston entraîné par le vilebrequin permet de recevoir le travail mécanique des forces pressantes lors de la dilatation des gaz chauds produits par la combustion de l'essence. Il coulisse entre le point mort haut (PMH) où le volume de la chambre de combustion est minimal $V = V_{\min}$ et le point mort bas où le volume est maximal $V = V_{\max}$. Le volume ainsi balayé est appelé la cylindrée, il est noté $C_Y = V_{\max} - V_{\min} = 2000 \text{ cm}^3$. Le mélange détonant air+essence est introduit dans le cylindre par l'intermédiaire d'une valve : la soupape d'admission. Les gaz de combustion sont évacués par une autre valve : la soupape d'échappement. L'ouverture et la fermeture des valves sont commandées par l'arbre à cames et les culbuteurs.

Le fonctionnement du moteur est cyclique. Il se décompose en 4 temps successifs décrits comme suit :

- Premier temps : l'admission. La soupape d'admission s'ouvre ; le piston descend et aspire le mélange gazeux air+essence venant du carburateur.
- Second temps : la compression : les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ; le piston, en remontant, comprime le mélange.



- Troisième temps : La combustion et la détente : les soupapes sont encore fermées ; une étincelle jaillissant de la bougie provoque la combustion du mélange. La pression augmente brutalement, le piston est repoussé : ce temps est moteur.
- Quatrième temps : l'échappement. Le piston remonte, la soupape d'échappement s'ouvre. Les gaz brûlés sont éjectés.

A la fin du dernier temps, le piston et les soupapes sont revenus dans leur position initiale.

Le fonctionnement du moteur est schématisé sur un diagramme de Watt (P, V) où P est la pression du gaz contenu dans le volume V de la chambre du cylindre. Les étapes sont les suivantes :

- I→A : admission du mélange gazeux air+essence dans la chambre de combustion à température ambiante $T_A = 300 \text{ K}$ et sous pression atmosphérique $P_A = 1 \text{ bar}$;
- A→B : compression adiabatique et réversible du mélange (les frottements du piston sur le cylindre sont négligés) ;
- B→C : l'étincelle provoque l'explosion du mélange suivie d'une compression isochore ;
- C→D : fin de la combustion suivie d'une détente adiabatique et réversible du gaz brûlé ;
- D→A : l'ouverture de la soupape d'échappement ramène le gaz brûlé à la pression atmosphérique ;

- A→I : la remontée du piston évacue le gaz brûlé vers l'extérieur.

Le système fermé constitué du fluide gazeux décrit indéfiniment le cycle ABCD appelé cycle de Beau de Rochas (brevet d'intention déposé en 1862 ; première mise en application sur monocylindre en 1876). Dans cette approche idéalisée, le mélange initial air+essence et les gaz brûlés sont assimilés à un même gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = C_{pm}/C_{vm} = 1.35$ constant et le nombre n de moles de gaz admis dans le cylindre (à l'état A) est supposé inchangé par la combustion interne.

1 Etude du cycle

□ 1 – Justifier le caractère adiabatique de la compression AB, de la détente CD et le caractère isochore de la combustion BC et du refroidissement DA. Pourquoi ne prend-on pas en compte les étapes IA et DI au cours desquelles le système constitué par le gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert ?

□ 2 – Q_{BC} est le transfert thermique mis en jeu dans l'étape BC. Exprimer Q_{BC} en fonction de R, n, γ, T_B et T_C . Dans quel sens le transfert thermique s'effectue-t-il ?

□ 3 – Exprimer de même Q_{DA} en fonction de R, n, γ, T_D et T_A et commenter son signe.

□ 4 – W est le travail total échangé au cours du cycle ABCD. Exprimer W en fonction de Q_{BC} et Q_{DA} .

2 Rendement thermique

□ 5 – Définir puis exprimer le rendement thermique r_{th} du moteur en fonction de T_A, T_B, T_C et T_D .

Le rapport volumétrique a_V (encore appelé de manière impropre *taux de compression*) est défini de la façon suivante :

$$a_V = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (1)$$

□ 6 – Exprimer le rendement thermique r_{th} en fonction de γ et a_V uniquement. Comment r_{th} varie-t-il en fonction de a_V ? Calculer sa valeur pour un rapport volumétrique $a_V = 9$ (cette valeur sera conservée pour la suite du problème).

Le rendement global r du moteur dépend du rendement thermique, mais aussi du rendement mécanique r_m caractérisant le transfert d'énergie du piston vers le vilebrequin. Le rendement mécanique n'excède pas 85 % et peut descendre en dessous de 60 % pour un moteur usagé.

□ 7 – Calculer le rendement global r du moteur pour un rendement mécanique de 75 % et en déduire la volume d'essence produisant effectivement du travail sur 10 L d'essence consommés.

3 Réaction de combustion

La réaction qui a lieu au sein de la chambre est une réaction de combustion entre le carburant (dans le problème, l'octane C_8H_{18} sera choisi) et le comburant, l'air. Ceux-ci sont injectés dans les proportions stoechiométriques.

□ 8 – Que signifie "enthalpie standard de formation" d'un constituant chimique ?

On définit la réaction d'atomisation comme une réaction au cours de laquelle une molécule gazeuse est entièrement décomposée en ses atomes à l'état gazeux, son enthalpie de réaction étant la somme des enthalpies de dissociation des liaisons de la molécule. On rappelle par ailleurs que la forme stable du carbone à température et pression atmosphérique est le graphite, la structure cristallographique associée a une coordinence de 4 avec des liaisons covalentes.

□ 9 – Montrer que l'enthalpie standard de formation de l'octane gazeux $\Delta_f H^\circ(C_8H_{18})$ vaut $5079 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ à 298 K. (*question difficile*)

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (noté PCI) est la quantité d'énergie thermique libérée par kilogramme de carburant.

□ 10 – Ecrire la réaction de combustion et déterminer son enthalpie standard. En déduire le pouvoir calorifique interne de l'octane à pression constante.

4 Influence de la combustion

□ 11 – Exprimer puis calculer le nombre n de moles de mélange gazeux aspiré par le cylindre au cours de la phase d'admission IA en fonction de P_A, T_A, R et C_Y .

□ 12 – Au point B du cycle, exprimer la température T_B et la pression P_B qui règnent dans la chambre de combustion au moment de l'explosion, en fonction de T_A, P_A, a_V et γ . Effectuer les applications numériques.

Une anomalie de combustion est l'auto-allumage qui limite l'augmentation a priori recherchée du rapport volumétrique : le mélange air+essence s'enflamme spontanément dans certaines conditions de confinement avant le déclenchement de l'étincelle. Ce phénomène est reconnaissable aux cliquetis métalliques émis par le moteur.

- **13** – La température d’auto-allumage étant de 430°C , calculer le rapport volumétrique maximal a_V^{max} permettant d’éviter l’auto-allumage au cours de la phase AB. En déduire le rendement thermique maximal du moteur dans ces conditions.
- **14** – A partir de l’équation de la combustion, déterminer la masse m d’octane injectée pour la combustion, sachant que l’air est composé de 21 % de dioxygène et 79 % de diazote.
- **15** – Expliquer pourquoi le mélange initial air+essence et les gaz d’échappement peuvent être assimilés en première approximation à un même gaz parfait. Justifier qualitativement pourquoi le meilleur fonctionnement du moteur est obtenu lorsque le carburant et le comburant constituent un mélange stoechiométrique.
- **16** – Calculer la température T_C et la pression P_C qui règnent dans la chambre en fin de combustion. Comment expliquez-vous ces valeurs anormalement élevées ?
- **17** – L’automobile se déplace sur une autoroute à la vitesse constante de 110 km/h, le vilebrequin effectuant 3500 tours par minute. Si le moteur fonctionnait exactement selon le cycle de Beau de Rochas, un cycle correspondant à 2 tours du vilebrequin, calculer la consommation en carburant pour 100 km parcourus. Commenter ce résultat.

DONNÉES NUMÉRIQUES

Données numériques générales :

Masses molaires (en g.mol^{-1}) :	H : 1 ; C : 12 ; N : 14 ; O : 16 ; Pb : 207
Constante des gaz parfaits :	$R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
Constante de Faraday :	$\mathcal{F} = 96500 \text{ C.mol}^{-1}$
Masse volumique de C_8H_{18} (liquide) :	$\rho = 720 \text{ kg.m}^{-3}$
Composition de l’air (pourcentages molaires) :	20,9 % O_2 et 79,1 % N_2

Données thermodynamiques : (à 298 K) supposées indépendantes de la température

Élément, Composé	$\text{H}_{2(\text{g})}$	$\text{O}_{2(\text{g})}$	$\text{N}_{2(\text{g})}$	$\text{C}_{(\text{g})}$	$\text{H}_{(\text{g})}$	$\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$	$\text{CO}_{2(\text{g})}$	$\text{CO}_{(\text{g})}$	$\text{NO}_{(\text{g})}$	C-C	C-H	H-H
Enthalpie standard de formation $\Delta_f H^\circ$ (kJ.mol^{-1})	0	0	0	716,7	218,0	-241,8	-393,5	-110,5	90,2			
Entropie molaire standard (S°) ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)	130,6	205,0	191,5	158,0	114,6	188,7	213,6	197,6	210,7			
Enthalpie standard de dissociation de liaison (kJ.mol^{-1})										345	415	436