

Appliquez-vous dans la rédaction, justifiez et encadrez vos résultats !!

Problème 1 : Spectrographe

1) Spectrographe de Dempster

Une source ponctuelle S d'ions positifs émet un pinceau très étroit de particules de masses m_1 et m_2 , de charges respectives q_1 et q_2 , avec une vitesse initiale négligeable ; ils sont accélérés par une d.d.p. U , vers la fente A d'un plan P , puis déviés par un champ magnétique \mathbf{B} uniforme perpendiculaire à leur trajectoire.

a) Après A , On admet que la trajectoire est circulaire. Montrez qu'elle est uniforme et déterminez le rayon R de la trajectoire. Il faudra justifier clairement.

b) Exprimer la distance d de leurs points d'impact sur le plan P .

*

c) Quelle doit être la largeur maximale d'un collecteur C , convenablement placé sur le plan P , qui permettrait de séparer les deux isotopes du mercure ($Z = 80$) de masses atomiques $A_1 = 200$ et $A_2 = 202$.

On donne : $B = 0,2 \text{ T}$; $U = 12 \text{ kV}$; charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; unité de masse atomique : $1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

* Il faudra déterminer au préalable la vitesse des ions en A .

2) Spectrographe de Bainbridge

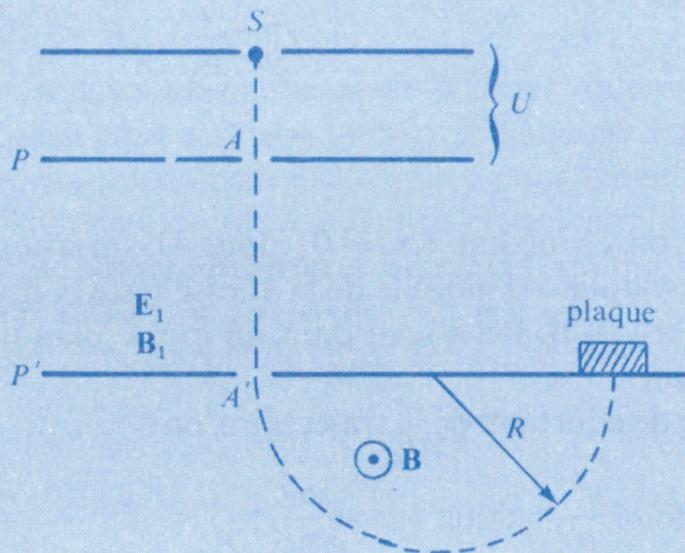


Fig. VI-16.

Des ions positifs de masses et de charges différentes, émis par la source S sans vitesse, accélérés par la d.d.p. U , traversent la fente A du plan P , puis passent entre P et P' dans un filtre de vitesse constitué par deux champs \mathbf{E}_1 et \mathbf{B}_1 uniformes et orthogonaux, puis pénètrent en A' dans une capsule où règne une induction \mathbf{B} uniforme qui leur impose une trajectoire circulaire de rayon R ; enfin, ils impressionnent une plaque photographique.

a) Expliquer le rôle du filtre de vitesse.

b) Exprimer la charge massique q/m des particules qui impressionnent la plaque en fonction de E_1 , B_1 , B et R .

c) Calculer la distance, sur la plaque photographique, entre les points d'impact des isotopes de mercure.

Application numérique : $B = 0,2 \text{ T}$; $E_1 = 6 \cdot 10^4 \text{ V/m}$, $B_1 = 0,1 \text{ T}$.

Problème 2 : Moteur thermique (E3A PSI)

Ce problème illustre le **fonctionnement d'un moteur automobile** et comporte quatre volets indépendants : analyse thermodynamique du moteur automobile (première partie), pétrochimie et carburants (seconde partie), étude de l'allumage commandé du moteur à essence (troisième partie) et contrôle des gaz d'échappement (quatrième partie).

Remarques préliminaires importantes : il est rappelé aux candidat(e)s que :

- les explications des phénomènes étudiés interviennent dans la notation au même titre que les calculs.
- les résultats exprimés sans unité ne seront pas comptabilisés.
- dans tous les calculs, les gaz sont assimilés à des gaz parfaits (leurs pressions partielles sont notées en caractères italiques). Seront utilisés les indices suivants : (l) pour un liquide et (g) pour un gaz. On notera \ln , le logarithme népérien et \log , le logarithme décimal.
- les données numériques générales sont répertoriées à la fin de la seconde partie du problème.

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 deux des moteurs à combustion interne car la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur.

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.

PREMIERE PARTIE : ÉTUDE THERMODYNAMIQUE DU MOTEUR AUTOMOBILE

Le moteur comporte en général plusieurs cylindres. Dans chaque cylindre (figure 1), 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 V de la chambre de combustion est minimal $V = V_{\min}$ et le **point mort bas** (PMB) où le volume de la chambre de combustion est maximal $V = V_{\max}$. Le volume ainsi balayé est appelé la cylindrée, il est noté $C_V = V_{\max} - V_{\min} = 2000 \text{ cm}^3$. 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.

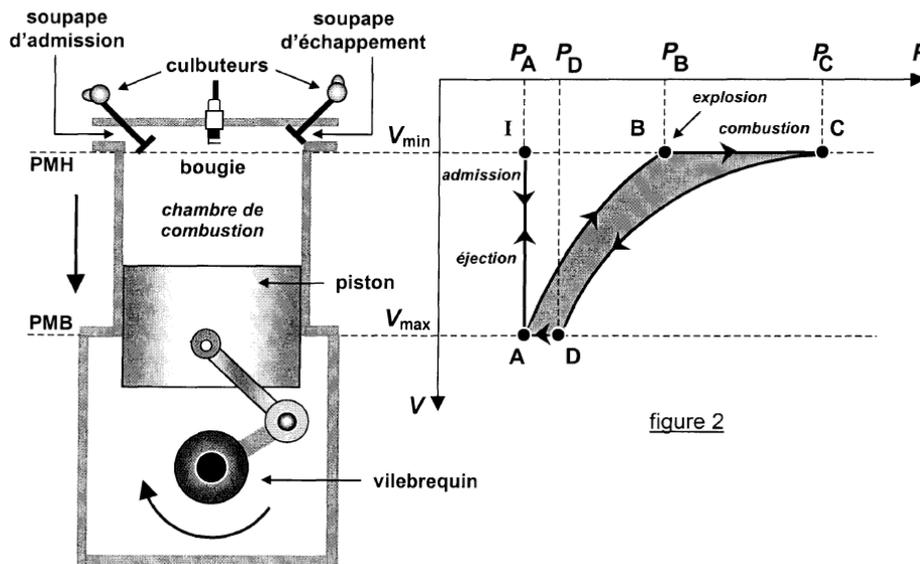


figure 1

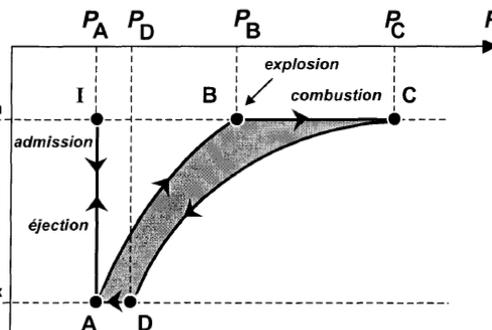


figure 2

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

1^{er} temps : l'admission. La soupape d'admission s'ouvre ; le piston descend et aspire le mélange gazeux {air-essence} venant du carburateur.

2^{ème} temps : la compression. Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ; le piston, en remontant, comprime le mélange.

3^{ème} 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.

4^{ème} temps : l'échappement. Le piston remonte ; la soupape d'échappement s'ouvre. Les gaz brûlés sont éjectés.

A la fin du quatrième 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 (figure 2). Les étapes successives du cycle sont décrites comme suit :

[I → A] : admission du mélange gazeux {air-essence} dans la chambre de combustion à la température ambiante $T_A = 300\text{ K}$ et sous la pression atmosphérique $P_A = 1\text{ bar}$,

[A → B] : compression adiabatique et réversible du mélange {air-essence} (les frottements du piston sur le cylindre sont négligés),

[B → C] : en B, l'étincelle provoque l'explosion du mélange suivie d'une compression isochore,

[C → D] : en C, 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 Beau de Rochas** (brevet d'invention déposé en 1862, première mise en application sur monocylindre en 1876 par Otto). Dans cette approche idéalisée, le mélange initial {air-essence} et les gaz brûlés d'échappement 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.

A1 / ÉTUDE DU CYCLE

A1*a. 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 [AI] au cours desquelles le système constitué par le gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert ?

A1*b. 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 Q_{BC} s'effectue-t-il ?

A1*c. Q_{DA} est le transfert thermique mis en jeu dans l'étape [DA]. Exprimer Q_{DA} en fonction de R, n, γ, T_D et T_A . Dans quel sens le transfert thermique Q_{DA} s'effectue-t-il ?

A1*d. W est le travail échangé au cours du cycle ABCD. Exprimer W en fonction de Q_{BC} et Q_{DA} .

A2 / RENDEMENT THERMIQUE

A2*a. Définir puis exprimer le rendement thermique r_{th} en fonction de Q_{BC} et Q_{DA} , puis en fonction de T_A , T_B , T_C et T_D .

A2*b. Le rapport volumétrique a_v (encore appelé de manière impropre "taux de compression") est défini de la façon suivante : $a_v = V_{max} / V_{min}$. 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 dans la suite du problème).

Le rendement global r du moteur dépend du rendement thermique r_{th} 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.

A2*c. Calculer le rendement global r du moteur pour un rendement mécanique de 75 % et en déduire le volume d'essence produisant effectivement du travail sur 10 L d'essence consommés.

A3 / INFLUENCE DE LA 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 des proportions stœchiométriques.

A3*a. Exprimer puis calculer le nombre n de moles du 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 .

A3*b. 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.

A3*c. 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. 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.

A3*d. Ecrire l'équation de la combustion. En déduire la masse m d'octane injectée pour la combustion, sachant que la composition de l'air (en pourcentages molaires) est 20,9 % en O_2 et 79,1 % en N_2 .

A3*e. Expliquer pourquoi le mélange initial {air-essence} et les gaz d'échappement peuvent-ils être assimilés en première approximation à un même gaz parfait. Justifier qualitativement pourquoi le meilleur fonctionnement du moteur est obtenu lorsque carburant et comburant constituent un mélange stœchiométrique.

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (noté P_{CI}) est la quantité de chaleur libérée par kilogramme de carburant. Dans le cas de l'octane et dans ces conditions de confinement, il est de 44700 kJ.kg^{-1} .

A3*f. 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 ?

A3*g. L'automobile se déplace sur une autoroute à la vitesse constante de 110 km.h^{-1} , le vilebrequin effectuant 3500 tours par minute. Si le moteur fonctionnait exactement selon le cycle Beau de Rochas, un cycle correspondant à 2 tours du vilebrequin, calculer la consommation en carburant \mathcal{C} pour 100 km parcourus et la puissance \mathcal{P} développée par le véhicule en chevaux (un cheval-vapeur est équivalent à une puissance de 736 W). Commenter ce résultat.