

Travail demandé

La copie doit être propre, lisible, sans faute d'orthographe (*pas trop*). Les pages doivent être numérotées et **les résultats soulignés ou encadrés**. Un résultat donné sans justification, à moins que l'énoncé le précise, est considéré comme faux.

Le devoir comporte 2 exercices indépendants **A RÉDIGER SUR DES COPIES SÉPARÉES**.

Ayez confiance en vous, vous savez faire plein de choses! Prenez votre temps à chaque question pour expliquer votre démarche.

La calculatrice est autorisée. Bon courage!

1 Moteur diesel

Peugeot 206

Le cycle Diesel est un cycle de moteur thermique (*généralement utilisé sur les camions*) où la combustion du carburant n'est pas déclenchée par une étincelle commandée, mais par un phénomène d'auto-allumage du carburant lorsque la pression dépasse une pression critique. On raisonnera sur un cycle fictif fermé sans se préoccuper des étapes consistant à évacuer les gaz issus de la combustion (échappement) et celle où on injecte un mélange d'air frais et de carburant (admission).

L'air est initialement aspiré depuis l'atmosphère extérieure (pression $P_0 = 1,0\text{bar}$, température $T_0 = 300\text{K}$) dans un piston de volume $V_A = 2,6\text{L}$. Il subit ensuite :

- ▷ une compression adiabatique réversible $A \rightarrow B$. Dans l'état B , le mélange air+carburant atteint une pression P_B suffisante pour que le carburant s'enflamme : c'est l'explosion.
- ▷ On représente la phase de combustion par un échauffement isochore $B \rightarrow C$ suivi d'un échauffement isobare $C \rightarrow D$
- ▷ un détente adiabatique réversible $D \rightarrow E$
- ▷ une transformation isochore $E \rightarrow A$ retourne à l'état initial

La puissance d'un moteur dépend du rapport de compression $\alpha = \frac{P_B}{P_0}$ lors de la phase de compression.

1. Estimer la quantité d'air n dans le cylindre. Faire l'application numérique.
2. L'air étant modélisé comme un gaz parfait diatomique, donner la valeur de son coefficient de compression adiabatique $\gamma = C_P/C_V$.
3. Représenter, en justifiant la forme des courbes, ce cycle sur un diagramme (P, V) .
4. Montrer que la température en B et la pression en B peuvent s'écrire comme :

$$T_B = \alpha^a T_0 \text{ et } V_B = \alpha^b V_A$$

avec a et b deux nombres qu'on exprimera en fonction de γ .

5. Pour que le carburant s'enflamme, la température en B doit être supérieure à $T_{exp} = 250^\circ\text{C}$. En déduire la valeur minimale du rapport de compression α .

On prend par la suite $\alpha = 62$. L'explosion du carburant lors de la transformation $B \rightarrow D$ fait monter la température à $T_C = 1100\text{K}$ et $T_D = 2700\text{K}$.

6. Exprimer le transfert thermique total $Q_{exp} = Q_{B \rightarrow C} + Q_{C \rightarrow D}$ fourni par l'essence brûlée en fonction de $n, R, a, \alpha, \gamma, T_D, T_C$ et T_0 . Faire l'application numérique.

7. Montrer que la température en E est : $T_E = \left(\alpha^b \frac{T_D}{T_C}\right)^{\gamma-1} T_D$.
8. Exprimer le transfert thermique total Q_{cycle} reçu sur le cycle en fonction de n , R , γ , α , T_D , T_C , et T_0 .
9. En déduire le travail total reçu sur le cycle. Faire l'application numérique et discuter son signe.

La puissance mécanique est définie comme : $\mathcal{P} = -W_{cycle}/\Delta t$, avec Δt la durée d'un cycle.

10. Calculer la puissance mécanique fournie par un tel moteur tournant à 4000 tours/minute.

Entropie d'une explosion

L'explosion du carburant est représentée par la transformation $B \rightarrow C \rightarrow D$. Au cours de ces deux transformations, le gaz dans le piston est au contact avec l'essence brûlée qui est à température T_D .

On rappelle l'expression de l'entropie d'un gaz parfait :

$$S(T, V) = \text{cte} + \frac{nR}{\gamma - 1} \ln T + nR \ln V$$

11. Montrer que l'entropie créée au cours de la transformation $B \rightarrow C$ est :

$$S_{B \rightarrow C}^c = \frac{nR}{\gamma - 1} \left(\ln \frac{T_C}{\alpha^a T_0} - \frac{T_C - \alpha^a T_0}{T_D} \right)$$

12. De la même façon, exprimer l'entropie créée au cours de la transformation $C \rightarrow D$.
13. Faire les applications numériques et discuter laquelle des deux transformations est la plus grande source d'irréversibilité.
14. En réalité, la température de l'essence brûlée est supérieure à la température finale T_D . A-t-on alors sous-estimé ou sur-estimé la création d'entropie ? Justifier.

Fast an Furious : amélioration par un turbo-compresseur

Afin d'améliorer la puissance du moteur, il faut augmenter la quantité de carburant injecté et brûlé lors d'un cycle. Lors de la phase d'explosion, une mole de carburant injecté réagit avec 12,5 moles de dioxygène de l'air lors d'une réaction fortement exothermique : c'est l'explosion.

15. En supposant que 20% de l'air est constitué de dioxygène, estimer la quantité de matière maximale de carburant qui peut réagir.

Pour augmenter la quantité n d'air du système, et donc la quantité de carburant injectable, on utilise en amont du cycle Diesel un turbo-compresseur qui servira à comprimer l'air atmosphérique avant de l'injecter dans le cycle.

- ▷ En partant de A_0 ($P_{A_0} = 1,0 \text{ bar}$, $T_{A_0} = 300 \text{ K}$), on effectue une compression adiabatique réversible jusqu'à l'état A_1 (pression P_{A_1});
- ▷ l'air est alors refroidi de façon isobare jusqu'à l'état A' ($P_{A'}$, $T_{A'} = 300 \text{ K}$, $V_{A'} = 2,6 \text{ L}$). Le cycle Diesel précédent est alors décrit à partir de l'état A' .

On cherche à multiplier par x la quantité maximale de carburant qu'on peut injecter et donc à multiplier par autant la quantité n' d'air du système $n' = xn$.

16. Justifier par des arguments physiques pourquoi les températures du cycle restent les mêmes. Par combien sont alors multipliées les pressions ?
17. Exprimer le volume initial d'air V_{A_0} à aspirer en fonction de x et V_A .

La compression $A_0 \rightarrow A_1$ est effectuée par un turbo-compresseur : c'est un moteur qui utilise une partie du transfert thermique $E' \rightarrow A'$ pour s'alimenter.

18. Exprimer le travail nécessaire à fournir pour réaliser la transformation $A_0 \rightarrow A_1$ en fonction de x , n , R , γ et T_0 .
19. Exprimer la part du transfert thermique $Q_{E' \rightarrow A'}$ qui sert à réaliser la compression $A_0 \rightarrow A_1$. On prendra $x = 10$.

La transformation $A_0 \rightarrow A'$ aurait pu se réaliser en une seule étape via une compression isotherme.

20. La compression isotherme est-elle plus avantageuse ? On justifiera sans calcul. Justifier néanmoins pourquoi une telle transformation n'est pas utilisée ici.

Cocotte minute



Figure 1

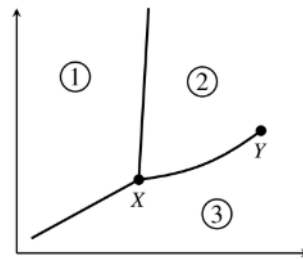


Figure 2

Une cocotte-minute (figure 1) est un appareil qui permet de faire cuire des aliments sous pression. Elle est constituée d'une cuve cylindrique, d'un couvercle hermétique solidement attaché à la cuve ainsi que d'une soupape qui permet d'évacuer la vapeur dès que la pression interne atteint une valeur limite de l'ordre de 2 bars.

Dans ce sujet on s'intéresse aux propriétés thermodynamiques de l'eau (utilisée pour la cuisson) puis à quelques applications de la cocotte-minute. Des données numériques pour l'eau sont fournies à la fin du sujet.

- La figure 2 représente le diagramme de phase d'un corps pur. Reproduire cette figure sur votre copie puis :
 - ▷ Indiquer les grandeurs sur les axes.
 - ▷ Attribuer les états correspondant aux domaines 1, 2 et 3.
 - ▷ Donner le nom des points X et Y. Expliquer ce que ces points ont de particulier.
 - ▷ Justifier que ce diagramme de phase ne peut pas être celui de l'eau.

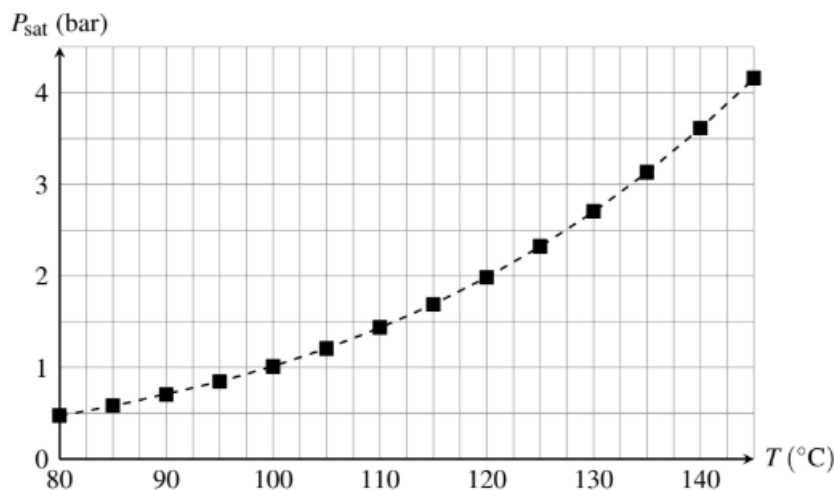


Figure 3

- La soupape limite la pression à 2 bars dans la cocotte-minute. À l'aide de la figure 3, qui représente les variations de la pression de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température, déterminer la température de cuisson. Quel est l'avantage par rapport à une casserole classique ?
- Dans la cuve vide de volume $V = 6\text{L}$, on place des glaçons de masse totale $m_1 = 50\text{g}$, de température $T_1 = -15^\circ\text{C}$ ainsi qu'une masse d'eau liquide $m_2 = 300\text{g}$, de température $T_2 = 20^\circ\text{C}$, puis on referme le

couvercle et on attend qu'un nouvel équilibre s'établisse. On ouvre alors le couvercle et on constate que les glaçons ont entièrement fondu. On note T_f la température de l'eau liquide à l'état final.

On suppose que la pression reste constante dans la cuve et que la transformation est suffisamment rapide pour négliger les transferts thermiques avec l'extérieur. On néglige l'air présent dans la cuve ainsi que la capacité thermique de la cuve.

- (a) Justifier que l'enthalpie du système eau liquide + glace se conserve au cours de cette transformation.
 - (b) Déterminer l'expression littérale de la variation d'enthalpie de la glace ΔH_1 et de la variation d'enthalpie de l'eau liquide ΔH_2 .
 - (c) En déduire la valeur de T_f .
4. Lorsque la cocotte-minute arrive à sa pression limite, la soupape s'ouvre et laisse s'échapper les gaz internes. Après un certain temps on peut supposer que l'air initialement présent s'est entièrement échappé de la cuve; celle-ci contient donc uniquement un mélange d'eau liquide et de vapeur d'eau, que l'on suppose en équilibre thermodynamique à tout instant à la pression $P = 2\text{bar}$ et à la température $T = 393\text{K}$ constantes. On suppose que la plaque de cuisson transmet à la cuve une puissance thermique constante $\mathcal{P}_{th} = 2,0\text{kW}$. On souhaite déterminer la masse de vapeur d'eau qui s'échappe par la soupape pendant une durée Δt donnée.
- (a) Calculer le transfert thermique Q reçu par l'eau en fonction de \mathcal{P}_{th} et Δt .
 - (b) Exprimer la masse d'eau qui se vaporise. En déduire la masse d'eau qui s'échappe par la soupape. On néglige la variation du volume d'eau liquide causée par cette vaporisation.
 - (c) En supposant que la cuve contient initialement un volume d'eau liquide $V_l = 1,0\text{L}$, déterminer au bout de combien de temps elle se vaporise entièrement.
5. On considère la cuve fermée (la soupape est fermée aussi) de volume $V = 6\text{L}$, contenant un mélange d'eau liquide et de vapeur d'eau à la pression $P = 2\text{bar}$ et la température $T = 393\text{K}$ (état M). La masse totale d'eau dans la cuve est $m = 50\text{g}$.
- (a) Tracer l'allure du diagramme de Clapeyron (P, v) de l'eau. Situer les domaines monophasé liquide, monophasé vapeur et diphasé liquide/vapeur. Situer le point critique. Tracer l'allure d'une courbe isotherme de température inférieure à la température critique. Justifier son allure dans le domaine diphasé et dans le domaine monophasé liquide. Placer sur cette isotherme le point correspondant à la vapeur saturante (état V) et au liquide saturant (état L).
 - (b) On note respectivement v, v_L et v_V les volumes massiques correspondant aux états M, L et V. Énoncer le théorème des moments puis calculer la masse d'eau liquide m_L et de vapeur d'eau m_V dans la cuve à l'équilibre.

Données numérique pour l'eau :

- ▷ masse molaire $M = 18\text{g.mol}^{-1}$
- ▷ masse volumique à 293K : $\rho = 1,0 \cdot 10^3\text{kg.m}^{-3}$
- ▷ volume massique du liquide saturant à 393K : $v_L = 0,892\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
- ▷ volume massique de la vapeur saturante à 393K : $v_V = 0,892\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$
- ▷ pression de vapeur saturante à 293K : $P_{sat}(293) = 2,34 \cdot 10^3\text{Pa}$
- ▷ capacité thermique massique de la phase solide (glace) : $c_1 = 2,1\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- ▷ capacité thermique massique de la phase liquide : $c_2 = 4,2\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- ▷ enthalpie massique de fusion à 273K : $L_{fus}(273) = 334\text{kJ.kg}^{-1}$
- ▷ enthalpie massique de vaporisation à 393K : $L_{vap}(273) = 2,20 \cdot 10^3\text{kJ.kg}^{-1}$

Fonction entropie d'une phase condensée : $S(T) = C_{ste} + mc \ln T$