Concours Blanc — Thermodynamique

Lycée Louis Thuillier - Physique-Chimie - PCSI - 2023-2024

Travail demandé

Le devoir dure 3h.

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 3 exercices indépendants.

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 !

Cycle de Diesel à double combustion

Un moteur à essence fonctionne grâce à la conversion, par cycles répétés, d'énergie chimique libérée par la combustion ou l'explosion d'un mélange d'air et de carburant, en travail moteur. Dans un moteur Diesel à double combustion, le cycle décrit par l'air dans un diagramme (P, V) est celui représenté sur la figure 1, abstraction faite des phases d'admission de l'air et d'échappement des gaz brûlés.

- La pression en **1** est $P_{\text{min}} = 1,0$bar, le volume $V_1 = 1,9$L et la température $T_1 = 293$K.
- Pendant la phase $1 \rightarrow 2$, l'air subit une compression adiabatique réversible.

- En 2, il y a introduction progressive du carburant qui s'enflamme spontanément. La combustion a lieu en deux temps : elle est d'abord isochore (phase $2 \rightarrow 3$) jusqu'à la pression $P_{\text{max}} = 60$ bar, puis elle devient isobare (phase $3 \rightarrow 4$). Au cours de cette combustion $2 \rightarrow 4$, l'air reçoit un transfert thermique $Q_{\text{comb}} = 2,7$ kJ.
- Les produits de la réaction se détendent de façon adiabatique et réversible (phase $4 \rightarrow 5$) jusqu'à revenir au volume V_1
- Le système étudié est l'air intérieur au cylindre, assimilé à un gaz parfait diatomique. La quantité de carburant injectée étant très faible devant la quantité d'air, on néglige son influence sur la pression et le volume.

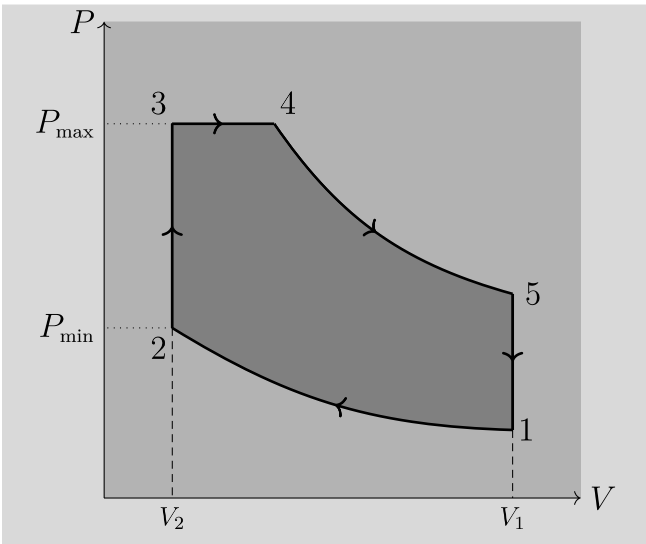


FIGURE 1 : Représentation schématique d'un cycle de Diesel à double combustion

Données numériques :

masse molaire de l'air : $M = 29 g.mol^{-1}$ *; coefficient adiabatique de l'air :* $\gamma = 1,4$ *; rapport volumétrique du moteur :* $\alpha = \dfrac{V_1}{V_2} = 15$ *; constante des gaz parfaits :* $R = 8,31 J.K^{-1}.mol^{-1}$

1. Calculer la quantité de matière n d'air à l'intérieur du cylindre.

2. Déterminer numériquement les capacités thermiques C_V et C_P de l'air.
3. Expliquer dans quelles conditions on peut supposer qu'une transformation est adiabatique. Sachant que le régime moteur est typiquement de l'ordre de plusieurs milliers de tours par minute, évaluer l'ordre de grandeur de la durée d'un cycle du cylindre et conclure.
4. Le cycle de la figure 1 est-il moteur ou récepteur ? Justifier. Préciser au cours de quelles transformations l'air fournit effectivement du travail (*positif*) au milieu extérieur.
5. Calculer P_2 et T_2.
6. Calculer le travail W_{12} reçu algébriquement par l'air au cours de la transformation $1 \rightarrow 2$.
7. Calculer T_3.
8. En appliquant le premier principe à l'air sur la transformation $2 \longrightarrow 4$, calculer T_4. En déduire V_4.
9. Calculer le travail W_{24} reçu au cours de la combustion.
10. Calculer P_5 et T_5.
11. Calculer le travail W_{45} reçu au cours de la détente adiabatique. En déduire le travail total W_{cycle} reçu par l'air sur un cycle.
12. Le rendement du moteur est défini comme le rapport du travail total fourni par l'air au milieu extérieur sur un cycle et de l'énergie thermique reçue au cours de la combustion :

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

    Calculer numériquement sa valeur et commenter le résultat obtenu.
13. Sachant que le moteur possède quatre cylindres et qu'il fournit une puissance $\mathcal{P} = 200\,\text{kW}$, calculer le régime moteur en tours par minute. On appelle ici "tour" une rotation de l'arbre de transmission qui communique aux roues l'énergie fournie par les cylindres. On admet que dans le moteur étudié chaque cycle thermodynamique effectué par l'air correspond à deux tours de l'arbre de transmission.

Mesurer γ

Une enceinte parfaitement calorifugée est séparée en deux par un piston mobile également calorifugé. Le compartiment de gauche renferme un gaz parfait de coefficient adiabatique γ inconnu. Une résistance électrique $r = 100\Omega$, de capacité thermique négligeable, se trouve également à l'intérieur. De l'autre côté de la paroi mobile, une pompe permet de modifier artificiellement la pression dans le compartiment de droite. **On s'intéressera par la suite uniquement au gaz dans le compartiment de gauche**.
Initialement, le volume de l'enceinte de gauche vaut $V_0 = 20\text{L}$, la pression du gaz $P_0 = 1{,}0\text{bar}$ et sa température $T_0 = 300\text{K}$.

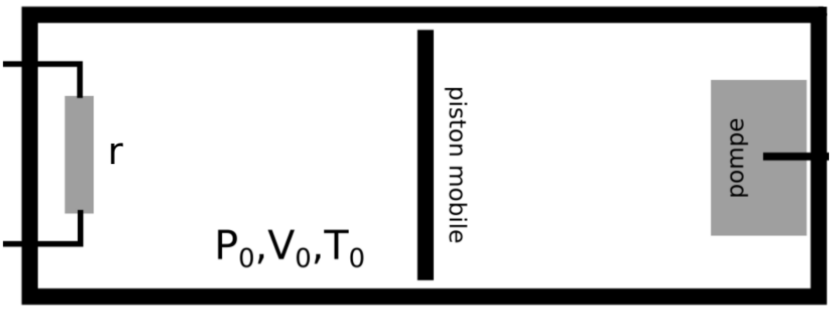


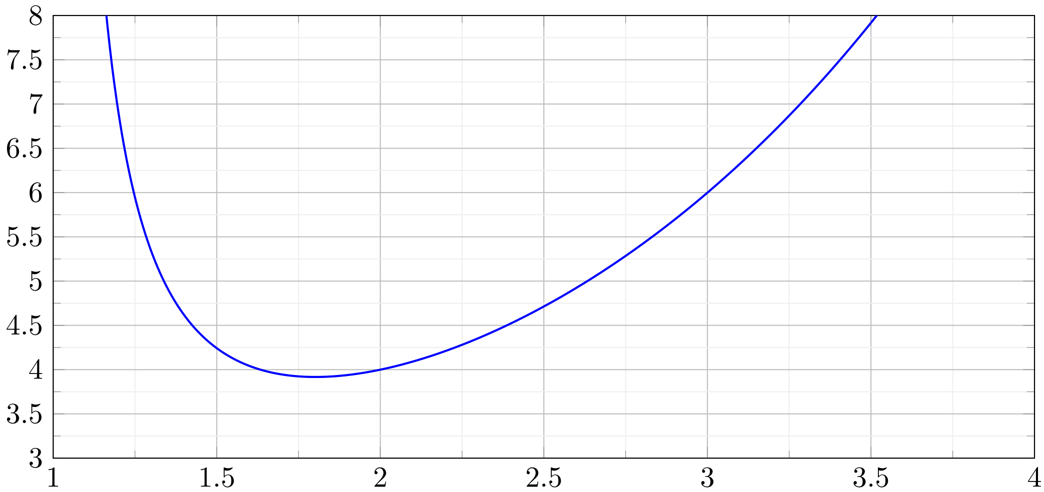
FIGURE 2 : Schéma du dispositif dans l'état initial

On effectue les transformations suivantes :

▷ **Transformation $A \rightarrow B$** :
on comprime très lentement et de façon réversible le compartiment de gauche jusqu'à atteindre un volume $V_0/2$. La résistance n'est pas alimentée.
On note alors P_1 et T_1 la pression et la température du gaz à la fin de la compression.

- **Transformation $B \to C$:**
  on allume le générateur électrique qui alimente la résistance et on débite un courant continu $I = 200\text{mA}$ pendant une durée $\Delta t = 40\text{min}$. La pompe permet de maintenir dans le compartiment de droite une pression constante égale à P_1. On supposera que cette transformation est mécaniquement lente.
  La transformation s'arrête lorsque le volume du gaz de gauche est revenu à la valeur initiale V_0. La température finale du gaz est notée T_2.

1. Qualifier les transformations $A \to B$ et $B \to C$.
2. Représenter la transformation $A \to B \to C$ dans un diagramme (P, V).
3. Rappeler l'expression de $C_{V,m}$ et $C_{P,m}$ pour un gaz parfait en fonction de γ et R. En déduire alors la valeur de γ pour un gaz parfait monoatomique et pour un gaz parfait diatomique.
4. Déterminer la pression P_1 ainsi que les températures T_1 et T_2 en fonction de, respectivement, P_0 et γ et T_0 et γ.
5. Exprimer le travail électrique reçu au cours de $B \to C$ en fonction de I, r et Δt. Faire l'application numérique.
6. Calculer le travail des forces de pression $W_{B\to C}$ reçu par le gaz lors de la détente $B \to C$ en fonction de P_0, V_0 et γ.
7. Exprimer la variation d'énergie interne $\Delta_{BC}U$ en fonction de γ, P_0 et V_0.
8. A l'aide du Premier Principe, montrer alors que : $\dfrac{rI^2\Delta t}{P_0V_0} = \dfrac{\gamma}{\gamma - 1}2^{\gamma-1}$
9. On trace ci-dessous la courbe de la fonction $f : x \mapsto 2^{x-1}\dfrac{x}{x-1}$. En déduire alors deux estimations de γ dans le cas du gaz de l'expérience. Laquelle vous paraît le plus plausible ? Justifier.



On se demande si on aurait pu réaliser l'expérience dans l'autre sens. On rappelle pour cela l'entropie d'un gaz parfait :

$$S(T, P) = S(T^\circ, P^\circ) + \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}\ln\frac{T}{T^\circ} - nR\ln\frac{P}{P^\circ}$$

avec T° et P° une température et une pression de référence.

10. Décrire qualitativement ce qui se passerait au niveau de la résistance dans le cas de la transformation $C \to B$.
11. Exprimer l'entropie créée au cours de la transformation $A \to B \to C$. Faire l'application numérique.
12. Peut-on réaliser la transformation $C \to B \to A$? Justifier.

Question ouverte : Expulsion d'un projectile par une arme à feu

L'étude de ce problème requiert de l'initiative. Il est demandé d'expliciter clairement la démarche entreprise, les hypothèses et approximations effectuées. ***Toute tentative pertinente, même infructueuse, sera valorisée.***

Le principe d'une arme à feu consiste à expulser un projectile à très haute vitesse au moyen d'un gaz produit par la combustion d'un composé chimique. On en présente ici un modèle très simplifié.

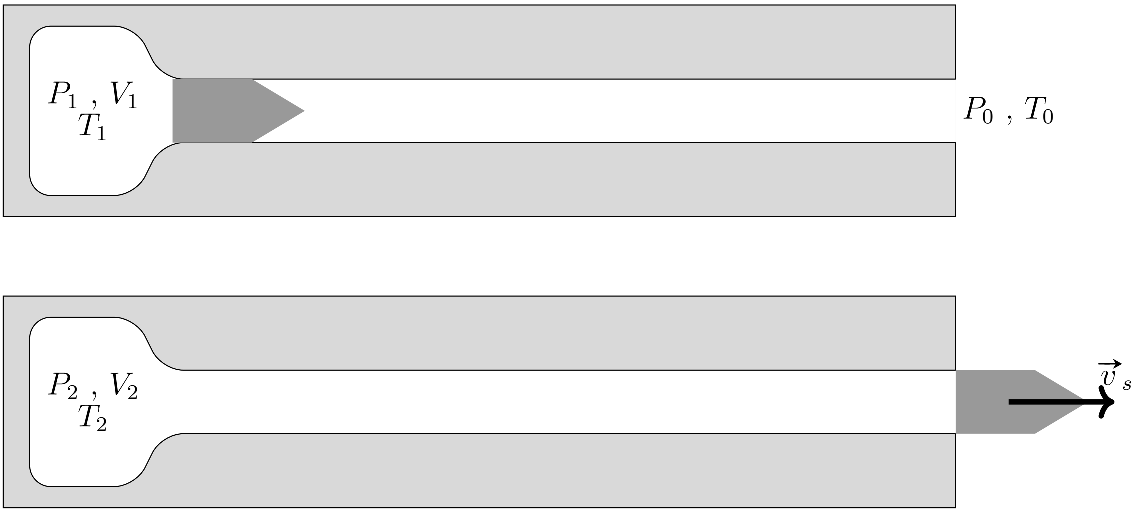


FIGURE 3 : Vue en coupe du canon d'une arme à feu

- Après combustion de la poudre, le mélange d'air et de gaz brûlés occupe le volume $V_1 = 5\,\text{cm}^3$, à la pression $P_1 = 600\,\text{bar}$ et la température $T_1 = 2300\,\text{K}$.
- Le projectile agit comme un piston étanche de masse $m = 10\,\text{g}$, initialement au repos, qui peut se translater le long du canon.
- L'expulsion du projectile s'accompagne d'une détente adiabatique et réversible des gaz internes. Le volume maximal de la chambre est noté V_2. La rapport volumétrique de la chambre est $\alpha = V_2/V_1 = 20$.
- Les gaz internes sont supposés parfaits, de coefficient adiabatique $\gamma = C_P/C_V = 1,1$ indépendant de la température et de la pression.
- L'atmosphère est à la pression $P_0 = 1,0\,\text{bar}$ et la température $T_0 = 293\,\text{K}$.

Question : estimer la vitesse d'expulsion v_s du projectile.