

Exercice 1 : Comparaison entre transformations

On considère un système composé d'une quantité de matière n de gaz parfait diatomique enfermée dans une enceinte. Cette enceinte est fermée par un piston de surface S et dont on négligera la masse, pouvant coulisser sans frottement. L'ensemble est situé dans l'atmosphère, dont on note T_0 et P_0 la température et la pression. On note I l'état initial. L'objectif est de comparer deux transformations du système : l'une brutale et l'autre lente.

Données : capacité thermique à volume constant : $C_V = \frac{5}{2}nR$

① Commençons par la transformation brutale : on lâche brusquement une masse M sur le piston, qui se stabilise en un état intermédiaire 1.

- a) Le meilleur modèle pour la transformation est-il isotherme ou adiabatique ? Peut-on en déduire un résultat sur la température T_1 ?
- b) Déterminer la pression P_1 .
- c) Établir le bilan énergétique de la transformation en explicitant chacun des termes.
- d) En déduire les caractéristiques T_1 , P_1 , V_1 de l'état 1.

On observe qu'en fait l'état 1 n'est pas un réel état d'équilibre : le piston continue de bouger, mais beaucoup plus lentement, jusqu'à atteindre l'état 2 qui est l'état final.

- e) Quel phénomène, négligé précédemment, est responsable de cette nouvelle transformation du système ?
- f) Déterminer les caractéristiques T_2 , P_2 , V_2 de l'état 2.
- g) Déterminer le travail reçu par le système, puis sa variation d'énergie interne et en déduire le transfert thermique reçu au cours de la transformation $1 \rightarrow 2$. En déduire le travail total et le transfert thermique total reçus au cours de la transformation brusque.

② Comparons maintenant à une transformation lente : la même masse M est lâchée très progressivement sur le piston, par exemple en ajoutant du sable « grain à grain ».

- h) Comment qualifie-t-on une telle transformation ? Que peut-on en déduire sur la température du système au cours de la transformation ?
- i) Déterminer la pression dans l'état final et en déduire le volume. Commenter.
- j) Établir le bilan énergétique de la transformation en explicitant chaque terme. Comparer à la transformation brutale. Commenter.

Exercice 2 : Travail fourni par un opérateur

On considère un cylindre horizontal muni d'un piston et contenant un gaz supposé parfait, de volume $V_0 = 5 \text{ L}$ et de pression $P_0 = P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$. Un opérateur, en agissant sur le piston, réalise une détente quasi-statique isotherme du gaz et double ainsi son volume.

- a) Exprimer et calculer le travail W reçu par le gaz et celui fourni par l'opérateur W_{op} . Commenter.
- b) Lorsque la détente est terminée, l'opérateur lâche le piston permettant ainsi le retour du piston, reprendre les questions précédentes.

Exercice 3 : Cycle de Lenoir

Le cycle de Lenoir est un modèle idéalisé de cycle moteur à deux temps, introduit par Lenoir en 1860 pour décrire le fonctionnement du moteur à gaz qu'il avait mis au point l'année précédente. On raisonne sur l'air présent dans la chambre de combustion du moteur, modélisé par un gaz parfait. Après une phase d'admission d'air dans la chambre de combustion et le processus d'inflammation, l'air dans la chambre est caractérisé par $\theta_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_1 = 10 \text{ L}$ et $P_1 = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$. À partir de cet état ①, l'air constitue un système fermé de quantité de matière n_0 . Le cycle qu'il subit se compose des étapes suivantes :

- $1 \rightarrow 2$: explosion isochore jusqu'à la pression P_2
- $2 \rightarrow 3$: détente isotherme jusqu'à un volume $V_3 = 2V_1$
- $3 \rightarrow 1$: compression isobare jusqu'à revenir au volume initial.

Les gaz brûlés sont ensuite évacués hors de la chambre de combustion, et un nouveau cycle démarre.

- On cherche à représenter le cycle dans le diagramme de Watt (P, V). Pour pouvoir définir les grandeurs d'état tout au long des transformations, on raisonne sur des transformations quasi-statiques. Déterminer l'équation d'une isotherme quasi-statique d'un gaz parfait dans le diagramme de Watt. En déduire la représentation du cycle.
- Déterminer la température $T_2 = T_3$ à laquelle a lieu la détente. En déduire la pression maximale atteinte P_2 .
- Calculer le travail total *fourni* par le moteur au cours du cycle.
- Justifier sans calcul qu'entre le début et la fin du cycle $\Delta U = 0$. En déduire le transfert thermique reçu par le système. Quelle est la source de ce transfert ?

Exercice 4 : Deux chemins pour une détente

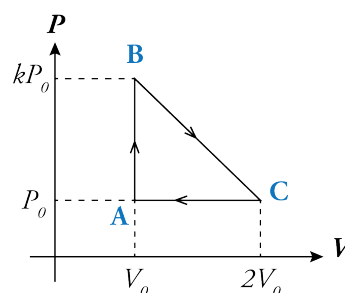
Une mole de dioxygène se détend d'un volume $V_1 = 10$ L à la température $T_1 = 298$ K à un volume $V_2 = 50$ L à la température $T_2 = 373$ K. On modélisera le gaz comme un gaz parfait avec $\gamma = 1,4$. Représenter la transformation, supposée mécaniquement réversible, dans le diagramme de Watt et calculer travail et transfert thermique reçus par le gaz dans les deux cas suivants :

- échauffement isochore suivi d'une détente isotherme
- détente isotherme suivie d'un échauffement isochore

Commenter les résultats en comparant la somme de W et Q dans chacun des cas.

Exercice 5 : Bilan de transferts thermiques lors d'une transformation

Un gaz parfait, de rapport $\frac{c_P}{c_V} = \gamma$, subit le cycle de transformations mécaniquement réversibles représenté ci-contre. Pour quelle valeur de k le transfert thermique reçu lors de la transformation BC est-il nul ? Peut-on dire pour autant que cette transformation BC est adiabatique ?



Exercice 6 : Transformation polytropique

Une transformation polytropique est une transformation d'un gaz pour laquelle il existe un coefficient $k > 0$ tel que $PV^k = \text{cte}$ tout au long de la transformation. De telles transformations sont intermédiaires entre des adiabatiques et des isothermes, et se rencontrent en thermodynamique industrielles, par exemple lorsque le système réfrigérant ne permet pas d'éliminer tout le transfert thermique produit par une réaction chimique. On raisonnera à partir d'une transformation quasi-statique d'un gaz parfait. On rappelle que pour un GP, on a

$$C_V = \frac{nR}{\gamma - 1} \quad \text{et} \quad C_P = \frac{\gamma nR}{\gamma - 1}$$

- À quelles transformations connues correspondent les cas $k = 0$, $k = 1$ et $k = +\infty$?
- Calculer le travail des forces de pression pour un gaz subissant une transformation polytropique entre deux états (P_0, V_0, T_0) et (P_1, V_1, T_1) en fonction d'abord des pressions et des volumes puis dans un second temps des températures seulement.
- Montrer que le transfert thermique au cours de la transformation précédente s'écrit

$$Q = nR \left(\frac{1}{\gamma - 1} - \frac{1}{k - 1} \right) (T_1 - T_0)$$

- Analyser les cas $k = 0$, $k = 1$ et $k = +\infty$, et vérifier la cohérence avec l'analyse initiale.
- À quel type de transformation correspond le cas $k = \gamma$?

Exercice 7 : Calorimétrie et changement d'état

Dans un récipient calorifugé, de très faible capacité thermique, on met en contact $m_g = 25$ g de glace à $\theta_g = 0$ °C et $m_v = 10$ g de vapeur d'eau à $\theta_v = 100$ °C. Déterminer la composition et la température à l'équilibre.

Données :

- enthalpie massique de fusion de la glace à $\theta = 0$ °C : $\Delta_{\text{fus}} h = 334$ J·g⁻¹.
- enthalpie massique de vaporisation de l'eau à $\theta = 100$ °C : $\Delta_{\text{vap}} h = 2260$ J·g⁻¹.
- capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{\text{eau}} = 4,2$ J·g⁻¹·K⁻¹.

Exercice 8 : Détente de Joule Gay-Lussac d'un gaz de Van der Waals

Le dispositif étudié dans cet exercice a été mis en point au XIX^e siècle par Joule et Gay-Lussac en vue d'étudier le comportement des gaz. Deux compartiments indéformables aux parois calorifugées communiquent par un robinet initialement fermé. Le compartiment (1), de volume V_1 , est initialement rempli de gaz en équilibre à la température T_i . Le vide est fait dans le compartiment (2). Une fois le robinet ouvert, un nouvel équilibre s'établit, caractérisé par une température T_f du gaz.

- Montrer que cette détente est isoénergétique, c'est-à-dire que l'énergie interne du gaz ne varie pas au cours de la transformation. Cette propriété dépend-elle du gaz ?
- Déterminer la température T_f dans le cas où le gaz est parfait.

L'expérience est réalisée avec de l'argon, qui peut être efficacement modélisé par un gaz de van der Waals. L'équation d'état d'un tel gaz s'écrit

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

avec a et b deux constantes positives caractéristiques du gaz et son énergie interne vaut

$$U = nC_{V_m}T - \frac{an^2}{V}$$

Les travaux de Van der Waals sur le comportement microscopique des gaz ont été de première importance, et il en a été récompensé par le prix Nobel en 1910. Pour l'argon, $C_{V_m} = 12 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

- Interpréter physiquement l'origine du terme de cohésion a et du volume exclu b . Nommer et interpréter la constante C_{V_m} .
- Expérimentalement, on observe que la température de l'argon diminue de 5,4 K au cours de la détente réalisée pour deux compartiments de volumes $V_0 = 1,0 \text{ L}$ et $n = 1,0 \text{ mol}$. En déduire la valeur du terme de cohésion a de l'argon.

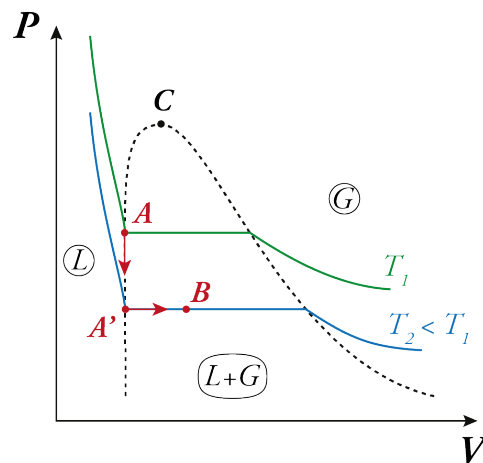
Exercice 9 : Détente isenthalpique dans une machine frigorifique

Dans le détendeur d'une machine frigorifique à écoulement de fluide, un fluide frigorigène de type CFC (chlorofluorocarbène) se refroidit et se vaporise partiellement. Ce détendeur est supposé calorifugé, et ne contient aucune partie mobile, si bien que le fluide ne reçoit pas d'autre travail que celui des forces de pression qui assurent l'écoulement.

Le fluide y pénètre à la température T_1 et à la pression $P_1 = P_{\text{sat}}(T_1)$ égale à la pression de vapeur saturante du CFC à cette température. Le mélange qui sort du détendeur est à la température T_2 et à la pression $P_2 = P_{\text{sat}}(T_2)$. Cette transformation est représentée entre A et B dans le diagramme de Clapeyron ci-contre. Le volume massique du CFC est supposé constant le long de la courbe de saturation.

On raisonne sur un système fermé constitué d'une masse m de CFC traversant le détendeur.

- Déduire du premier principe que le passage au travers du détendeur est isenthalpique, c'est-à-dire que l'enthalpie du système ne varie pas.
- Déterminer la fraction x de CFC qui s'est vaporisée au cours de la détente. On pourra raisonner sur une transformation impliquant le point A' indiqué sur le diagramme de Clapeyron.



Données :

- $T_1 = 305 \text{ K}$, $T_2 = 280 \text{ K}$.
- enthalpie massique de vaporisation à T_2 : $\Delta_{\text{vap}}h = 200 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- capacité thermique massique du CFC liquide : $c = 1,32 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.