Polycopié de TD de Thermodynamique

L2

2018-2019

Rana Farha

Travaux dirigés n°1 : Les bases de la thermodynamique

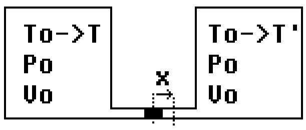
Exercice 1- Compression isotherme d’un gaz parfait.

Un système formé de n moles d'un gaz parfait donné, évolue entre un état d'équilibre initial et un état d'équilibre final en gardant une température constante. La pression finale augmente de 20 % (par rapport à la valeur initiale). De quel pourcentage varie le volume?

Exercice 2- Thermomètre différentiel à gaz parfait.

Un tel thermomètre, destiné à mesurer de faibles différences de température, est constitué de deux réservoirs à gaz parfaits identiques reliés par un tube de jonction de faible section s. Ce tube est horizontal et possède un index de mercure en son milieu qui isole un même volume V_0 de gaz parfait sous la pression P_0 et à la température T_0 dans chaque réservoir.

On porte le gaz de gauche à la température T et le gaz de droite à la température T' légèrement inférieure à T. L’index de mercure de déplace alors d’une petite longueur x ($x.s << V_0$).



Le but de l’exercice est d’exprimer la différence de température T-T' en fonction de V_0, s, x et T.

1) Pourquoi l’index de mercure est immobile au bout d’un moment ?
2) Comment cela se traduit-il d’un point de vue thermodynamique ?
3) Exprimer le volume de gauche V et le volume de droite V' en fonction de V_0, s et x.
4) Exprimer T' en fonction de T, V_0, s et x.
5) En déduire à l’aide d’un développement limité que l’on a

$$T - T' \approx \frac{2s.x}{V_0}.T$$

Exercice 3- Détendeur d’une bouteille d’argon.

Sur une bouteille en acier de hauteur $H=1,6m$, le fabricant porte les indications suivantes :

- Argon : $10\ m^3$
- *200 bars* à la température de *20C°*.

La bouteille est équipée d’un détendeur qui permet de délivrer de l’argon à la pression atmosphérique supposée égale à 1 bar tout en gardant la même température.

On considèrera que l’argon contenu dans cette bouteille se comporte comme un gaz parfait.

1) Connaissez-vous une utilisation industrielle de l’argon ?
2) Est-ce que la modélisation du comportement du gaz par le comportement d’un gaz parfait vous parait pertinente ?
3) Déterminer le volume interne de la bouteille ?
4) Quel est le volume utile V_{utile} de l’argon ? On entend par volume utile le volume récupérable de gaz.

5) A combien de mole de ce gaz correspond ce volume d'argon ?

Exercice 4- Surpression dans un thermomètre à alcool.

On considère un thermomètre à alcool à une température telle que son réservoir et sa hauteur sont complètement remplis de liquide. Son équation d'état est du type $V = f(P,T)$.
On connait les coefficients thermo élastiques suivants :

$$\alpha = 11{,}2.10^{-3}\,K^{-1} \text{ et } \chi_T = 3{,}4.10^{-5}\,atm^{-1}$$

On suppose que ces coefficients sont constants.

1) On considère une augmentation de température de $\Delta T = 0{,}5°C$. Quelle est la surpression créée dans le réservoir du thermomètre à alcool ?
2) Que se passe-t-il alors?
3) Donner un exemple concret de votre enfance où cette situation peut se produire. Proposer alors une solution.

Exercice 5- Dilatation d'une vitrine.

On considère la glace de verre d'une vitrine est un rectangle de *3 m x 4 m*. Cette vitrine étant en contact avec l'extérieur a sa température qui passe de *-10°C* en hiver à *+30°C* en été.

On considère que la longueur L de verre obéit à une fonction d'état du type: $L = f(T,P)$.

On définit le coefficient de dilatation linéaire du verre pour une longueur *L* de la façon suivante :

$$\lambda = \frac{1}{L}\left(\frac{\partial L}{\partial \mathrm{T}}\right)_{\mathrm{P}} = 8.10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$$

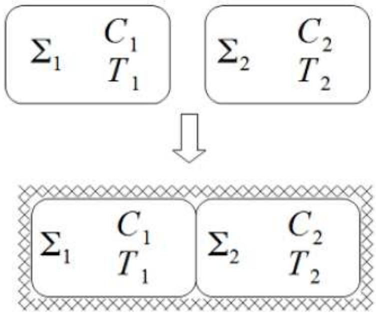
1) Donner l'expression approchée de la variation de la longueur *L* de verre en fonction du coefficient λ, de la longueur avant variation L_0 et de la variation de température *dT*.
2) Calculer les accroissements ΔL_1 et ΔL_2 des deux longueurs $L_1=3m$ et $L_2=4m$ de la vitre. Faire des applications numériques.
3) En déduire l'accroissement de la surface de la vitre lors du passage hiver/été. Faire une application numérique.
4) Comment le fabricant peut-il prendre cela en compte ?

Travaux dirigés n°2 : 1er principe de la thermodynamique

Exercice 1- Etude de deux briques.

Partie A.

On considère deux briques de capacités thermiques respectives C_1 et C_2, initialement aux températures T_1 et T_2. On les met en contact toutes les deux et on les isole thermiquement de l'extérieur :



1) Calculer la température finale T_f à laquelle arrive l'ensemble des deux briques au bout d'un moment.

Partie B.

On garde le même système initial mais on insère dans la brique 1 une résistance R_0 qui est parcourue par un courant I durant une durée τ.

2) Calculer la nouvelle température finale T'_f à laquelle arrive l'ensemble des deux briques au bout d'un moment.

Exercice 2- Travail des forces de pression d'un gaz parfait.

Soit n moles de gaz subissant une compression isotherme réversible de l'état 1 défini par (Po,To) à l'état 2 défini par$(2Po,To)$. Donner l'expression du travail $W_{1\to2}$ reçu par le gaz en adoptant le modèle du gaz parfait.

Exercice 3- Mesure de la capacité thermique de l'argent.

On se propose de mesurer la capacité thermique de l'argent à l'aide d'un calorimètre contenant une masse $m_e = 200g$ d'eau à la température $T_e=18.9°C$.

1) Dans une phase préliminaire, on a déterminé la capacité thermique Co du calorimètre en plongeant un conducteur ohmique, de résistance $R_0=100\Omega$, parcouru par un courant d'intensité $I = 0.8\ A$. Au bout d'un temps $\tau=100s$, on a constaté une élévation de température de $\Delta T=7K$. Calculer Co.
2) On introduit dans le même calorimètre, contenant toujours $m_e=200g$ d'eau à la température $T_e=18.9°C$, un bloc d'argent de masse $m_{Ag}=82g$ qui sort d'une étuve à la température $T_{Ag}=90°C$. Une fois l'ensemble en équilibre thermique, on note que sa température vaut T_f=20.3°C. Déterminer la capacité thermique massique C_{Ag} de l'argent.

On donne la capacité thermique massique de l'eau : $C_e = 4{,}187\ kJ.K^{-1}.kg^{-1}$.

Travaux dirigés n°2 : 1er principe de la thermodynamique

Exercice 4- Chauffage d'une école.

On étudie le chauffage d'une école pendant une journée d'hiver. On appelle T_{ext} la température de l'air à l'extérieur de l'école, que l'on suppose constante. On suppose de plus qu'à chaque instant toute l'école est à la même température $T(t)$. On note C la capacité thermique de l'école et on suppose que la puissance thermique P_{th} perdue par l'école est du type : $P_{th} = k.\left[T(t) - T_{ext}\right]$.

Données:

- $T_{ext} = 263\ K$;
- $C = 7{,}6.10^7\ J.K^{-1}$;
- $k=6.10^3 W.K^{-1}$.

Partie A.

On arrête le chauffage de l'école à l'instant $t=0$, la température de l'école étant $T_1=293K$.

1) En faisant un bilan thermique entre les instants t et $t+dt$, établir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.

2) Déterminer la température $T(t)$ de l'école à un instant t quelconque.

3) Calculer $T(t)$ à l'instant $t_1 = 3$ *heures*.

Partie B.

On suppose maintenant qu'à l'instant $t=0$, la température de l'école est $T_2=275K$ et le chauffage de l'école est mis en fonctionnement. Les radiateurs dégagent une puissance thermique $P_{ch}=210\ kW$ constante eu cours du temps.

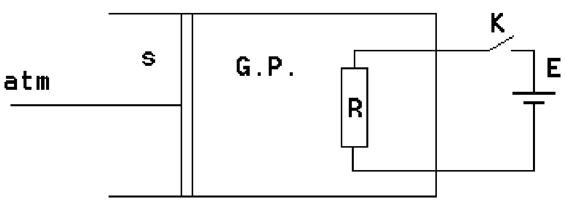
4) Etablir l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.

5) Déterminer la température $T(t)$ de l'école à un instant t quelconque.

6) Calculer l'instant t_2 pour lequel la température de l'école est égale à $T_3=293K$.

Exercice 5- Transformation isochore et isotherme d'un gaz parfait.

On étudie le dispositif de la figure suivante :



Un cylindre adiabatique fermé par un piston adiabatique, de section S, contient n moles d'un gaz parfait, initialement à la température T_0 et à la pression atmosphérique P_0. On connaît sa capacité thermique molaire à volume constant C_{vm}. Le cylindre contient également une résistance r alimentée par une source idéale de tension E.

Partie A.

L'opérateur fixe le piston dans sa position initiale et abaisse l'interrupteur K.

La résistance r varie en fonction de la température selon la loi suivante :

$$r(T) = r_0 \cdot \frac{T}{T_0}$$

1) Exprimer la loi de variation de la température T du gaz en fonction du temps t.

2) En déduire la loi de variation de la pression P du gaz en fonction du temps t.

Travaux dirigés n°2 : 1er principe de la thermodynamique

Partie B.

L'opérateur déplace désormais lentement le piston de manière à réaliser une transformation isotherme $(T = T_0)$ à partir de l'état (P_0, V_0, T_0) du gaz parfait et de la fermeture de l'interrupteur *K*.

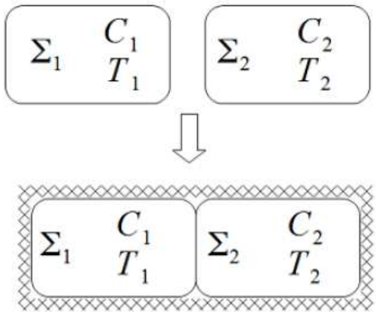
1) Exprimer la loi de variation du volume *V(t)* en fonction du temps *t*.
2) En déduire la vitesse du piston.

Travaux dirigés n°3 : 2nd principe de la thermodynamique

Exercice 1- Etude de la création d'entropie dans deux briques.

Partie A.

On considère deux briques de capacités thermiques respectives C_1 et C_2, initialement aux températures T_1 et T_2. On les met en contact toutes les deux et on les isole thermiquement de l'extérieur :



On a calculé précédemment que la température finale est $T_f = \dfrac{C_1.T_1 + C_2.T_2}{C_1 + C_2}$

1) Calculer la variation d'entropie ΔS_{Σ_1} de la brique Σ_1.

2) Calculer la variation d'entropie ΔS_{Σ_2} de la brique Σ_2.

3) Calculer la variation d'entropie $\Delta S_{\Sigma_2 \cup \Sigma_2}$ de l'ensemble des deux briques Σ_1 et Σ_2.

4) En déduire l'entropie créée lors de l'évolution du système.

Partie B.

On suppose maintenant que les deux briques ont la même capacité thermique que l'on notera C.

5) Montrer que la transformation est nécessairement irréversible si $T_1 \neq T_2$. Quelle est la cause de cette irréversibilité ?

Partie C.

On garde le même système initial mais on insère dans la brique 1 une résistance R_0 qui est parcourue par un courant I durant une durée τ.

On a calculé précédemment que la température finale est $T_f^{'} = \dfrac{C_1.T_1 + C_2.T_2 + R_0.I^2.\tau}{C_1 + C_2}$

6) Calculer l'entropie créée lors de l'évolution du système.

7) Montrer que si les briques sont identiques et initialement à même température la transformation est irréversible. Quelle est la cause de cette irréversibilité ?

Travaux dirigés n°3 : 2nd principe de la thermodynamique

Exercice 2- Entropie d'un gaz parfait en variable *(P,T)* et *(P,V)*.

Partie A.

1) Déterminer la variation de l'entropie du gaz parfait en fonction des variable P et T lors d'une transformation d'un état 1 à un état 2. (en partant de l'expression de la variation d'enthalpie)
2) Déterminer la variation de l'entropie du gaz parfait en fonction des variable P et V lors d'une transformation d'un état 1 à un état 2.

Partie B.

3) En déduire la variation d'entropie d'une mole de gaz parfait lorsqu'elle subit une transformation adiabatique réversible,
4) Déterminer la variation d'entropie d'une mole de gaz parfait lorsqu'elle subit une transformation isotherme de $P_0 = 1\ bar$, $V_0 = 22{,}4L$ à $P_1=5\ bar$.

On donne $R = 8{,}315\ J.K^{-1}.mol^{-1}$.

Exercice 3- Critère de réversibilité. Transformation monotherme. Bilan entropique.

On considère un solide de capacité thermique C, initialement à la température T_0. Il est mis en contact thermique avec une source de chaleur de température T_S invariable. Exprimer entre l'état initial et l'état final :

1) La variation d'entropie ΔS_{solide} du solide.
2) La variation d'entropie ΔS_{source} de la source.
3) La création d'entropie $S^{création}$ qui a eu lieu lors de transformation.
4) Vérifier que son signe est bien positif si $T_S = T_0.(1+\varepsilon)$ avec $|\varepsilon| << 1$.

Exercice 4- Effet Joule et création d'entropie.

On considère un conducteur ohmique de résistance électrique R indépendante de la température. Cette résistance est placée dans l'air ambiant à la température T_0 supposée constante. Elle est traversée par un courant électrique d'intensité I et dissipe par effet Joule une puissance électrique constante $P_{élec}$. En régime permanent, les fonctions d'état relatives au conducteur ohmique sont indépendantes du temps (en particulier l'énergie interne et l'entropie).

1) Appliquer le premier principe de la thermodynamique au conducteur ohmique. En déduire la chaleur échangée δQ_R par le conducteur avec le milieu extérieur en fonction de la durée dt de l'échange, de R et de I.
2) Quelle est l'entropie d'échange δS_R^e reçue par le conducteur ohmique entre t et $t+dt$.
3) En déduire l'expression de δS_R^c la production d'entropie par unité de temps dans le conducteur ohmique.

Travaux dirigés n°4 : Machines thermiques

Exercice 1- Etude d'une pompe à chaleur classique.

Pour maintenir la température d'un immeuble à $t_1=20°C$ alors que la température est $t_2=5°C$ à l'extérieur, il faut lui fournir une énergie de $W=2.10^8 J$ par heure. On posera $T = t + 274,3$. On utilise pour chauffer une pompe à chaleur.

1) Indiquer dans quelles conditions la pompe à chaleur doit fonctionner pour que la puissance consommée soit minimale.
2) Donner le schéma de principe en indiquant le signe des échanges de chaleur et de travail reçus par le fluide circulant dans la pompe à chaleur.
3) Définir et calculer l'efficacité théorique maximale e de cette pompe dans ces conditions.
4) Montrer qu'elle ne dépend que de T_1 et T_2.
5) Calculer la puissance minimale consommée par la pompe à chaleur.
6) Si l'efficacité réelle est de 4, quelle est alors la puissance consommée ?
7) La température extérieure étant toujours $t_2=5°C$, pour quelle température T_1 à l'intérieur e est-il maximum ? Interpréter. Dans quelles circonstances la pompe est-elle surtout utile ?

Exercice 2- Diagramme entropique. Rendement par méthode graphique.

On considère un gaz que l'on supposera parfait décrivant le cycle réversible suivant :

- AB : détente isotherme à T_2,
- BC : adiabatique de T_2 à $T_1 > T_2$,
- CD : compression isotherme à T_1,
- DA : adiabatique de T_1 à T_2.

1) Représenter le cycle en coordonnées de Clapeyron (P,V).
2) Représenter le cycle dans le diagramme entropique (T,S).
3) Déterminer à l'aide du diagramme de Clapeyron s'il s'agit d'un cycle du type moteur thermique ou du type pompe à chaleur ?
4) Retrouver le résultat précédent en utilisant le diagramme entropique.
5) Comparer les aires des deux représentations du cycle.
6) Définir l'efficacité e d'un tel système.
7) La calculer par méthode graphique. Dépend-elle de la nature du fluide ?

Travaux dirigés n°4 : Machines thermiques

Exercice 3- Cycle d'un moteur diesel.

On considère n moles de gaz parfait subissant les transformations réversibles suivantes :

- Etat (1) → état (2) Compression adiabatique
- Etat (2) → état (3) Dilatation à pression constante
- Etat (3) → état (4) Détente adiabatique
- Etat (4) → état (1) Refroidissement à volume constant.

N.B.

- Chaque état est défini par la pression P_i, la température T_i et le volume V_i (i variant de 1 à 4).
- On appelle $\gamma = \dfrac{C_{P_m}}{C_{V_m}}$.
- On définit $a = \dfrac{V_1}{V_2}$ et $b = \dfrac{V_4}{V_3}$.

1) Représenter sommairement le cycle sur un diagramme de Clapeyron.
2) Donner les expressions de la pression, du volume et de la température pour les états (3) et (4), en fonction de P_1, V_1, T_1, a et b.
Calculer numériquement ces valeurs pour une mole de gaz.
3) Calculer les travaux et chaleurs échangés pour toutes les transformations subies. Préciser notamment le sens des échanges.
4) Montrer que le rendement η d'un moteur fonctionnant suivant ce cycle, peut se mettre sous la forme suivante :

$$\eta = 1 + \frac{1 - \left(\dfrac{a}{b}\right)^{\gamma}}{\gamma.\left[a^{\gamma}.b^{-1} - a^{\gamma-1}\right]}$$

5) Calculer numériquement η. Commentez

Données numériques :

- $\gamma = 1,4$;
- $a=9$ et $b=3$;
- $P_1=1bar$; $T_1=300K$;
- $R = 8,315\ J.K^{-1}.mol^{-1}$;
- $Cvm=20,8\ J.K^{-1}.mol^{-1}$.