T1-TD

Révisions de thermodynamique

- Généralités : 01, 09, 10, 14, 16, 17, 18 ;
- Machines thermiques : 03, 04, 12, 13, 19 ;
- Calculs d'entropie : 02, 07 ;
- Calorimétrie : 05, 06, 08, 11, 15.

T1 — 01 Petits exercices indépendants

1) On considère un système contenu dans une boîte dont la face supérieure est un piston mobile. Une masse m est posée sur ce piston. L'atmosphère est à la pression P_0. Quelle est la pression du système ?

2) Le système précédent est un gaz parfait. On retire la masse m du dessus du piston. Le piston remonte d'une hauteur Δh. Calculer le travail reçu par le système lors de cette transformation.

3) On suppose la transformation adiabatique. Donner un argument pour justifier cette hypothèse. Calculer la hauteur Δh en fonction de la hauteur initiale de la boîte h_i et du coefficient γ du gaz.

4) Montrer qu'une machine cyclique monotherme ne peut que recevoir du travail et fournir de la chaleur.

5) On veut préparer un bain de $V_{\text{tot}} = 120$ L d'eau à $T = 35°$C en mélangeant un volume V_1 d'eau chaude à $T_1 = 72°$C et un volume V_2 d'eau froide à $T_2 = 16°$C. On négligera les échanges thermiques avec l'atmosphère et la baignoire. Déterminer V_1 et V_2.

6) Un courant électrique d'intensité $I = 1$ A circule dans un conducteur ohmique, de résistance $R = 30\,\Omega$ qui plonge dans de l'eau bouillante (à la température $T_0 = 373$ K) pendant une durée $\Delta t = 10$ s. La température du résistor passe de $T_i = 373$ K à $T_f = 400$ K. La capacité thermique du conducteur est $C = 45$ J·K^{-1}. On rappelle que l'entropie d'un solide est donnée par

$$\Delta S_{i \to f} = C \ln \left(\frac{T_f}{T_i} \right)$$

Calculer la variation d'entropie du conducteur. Application numérique.

7) La transformation est-elle réversible ?

8) En utilisant le premier (et le deuxième) principe, déterminer l'entropie échangée puis l'entropie créée. Application numérique. Commenter l'entropie créée.

9) On considère maintenant $n = 2$ moles de gaz parfait, que l'on fait passer de façon quasi-statique de l'état initial i $(P_i, V_i, T_i = 300 \text{ K})$ à l'état final f $(P_f = 3\,P_i, V_f, T_f = T_i)$ par trois chemins distincts :
- chemin 1 : transformation isotherme ;
- chemin 2 : transformation composée d'une isochore puis d'une isobare ;
- chemin 3 : transformation représentée par une droite en diagramme de Clapeyron (P, V).

Représenter les trois chemins dans un diagramme de Clapeyron.

10) Calculer dans chaque cas les travaux mis en jeu en fonction de n, R et T_i et faire l'application numérique.

11) On considère un gaz parfait. On appelle transformation polytropique d'indice k une transformation quasi-stationnaire telle qu'à chaque instant $P\,V^k = \text{cste}$. À quelle transformation correspondent les cas $k = 0$, $k = 1$ et $k = \gamma$?

12) Exprimer le travail reçu par le gaz parfait lors d'une transformation polytropique d'indice k entre les états initial (P_i, V_i, T_i) et final (P_f, V_f, T_f).

13) Pour un gaz parfait, sur un diagramme de Clapeyron (P, V), quelle est la forme d'une isotherme ? d'une isentrope ? Quelle courbe est la plus pentue ?

T1 — 02 Solides homogènes en contact

Deux solides homogènes Σ_1 et Σ_2, de capacités calorifiques C_1 et C_2, initialement aux températures $T_{1,0}$ et $T_{2,0}$ sont placés en contact dans une enceinte calorifugée.

1) Calculer la température finale T_f.

2) On considère Σ_1 seul. Calculer ΔS_1.

3) Calculer $S_{\text{éch},1}$ et $S_{c,1}$.

4) Les signes de ΔS_1, $S_{\text{éch},1}$ et $S_{c,1}$ ont-ils quelque chose de particulier ? Pourquoi n'utilise-t-on pas la notation Δ pour les entropies échangées et créées ?

5) On considère Σ_2 seul. Calculer ΔS_2, $S_{\text{éch},2}$ et $S_{c,2}$.

6) On considère enfin le système $\Sigma_1 + \Sigma_2$. Calculer ΔS, $S_{\text{éch}}$ et S_c.

T1 — 03 Cycle de Carnot

On considère n moles d'un gaz parfait réalisant un cycle de Carnot. Ce cycle est moteur, réversible, et est constitué de deux transformations isothermes AB et CD aux températures T_1 et T_2 ($T_2 > T_1$) et de deux transformations adiabatiques BC et DA.

1) Justifier le sens de parcours du cycle.

2) Donner pour chacune des quatre transformations i les expressions de W_i, Q_i et ΔU_i, en fonction des volumes, et de n, T_1 et T_2.

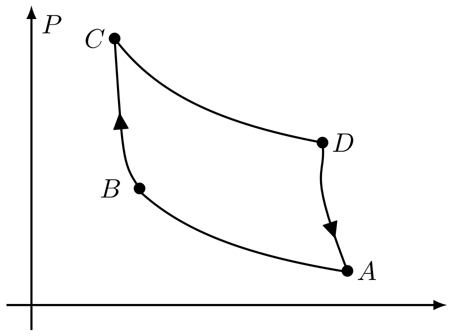
3) Montrer que

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

En déduire l'égalité (de Clausius)

$$\frac{Q_{CD}}{T_2} + \frac{Q_{AB}}{T_1} = 0$$

4) Définir et calculer le rendement de ce cycle.



T1 — 04 Cycle de Brayton

Un gaz parfait décrit un cycle de Brayton moteur réversible, caractérisé par deux isobares $A \to B$ et $C \to D$ (de pressions respectives P_1 et P_2 avec $P_1 < P_2$) alternées avec deux adiabatiques $B \to C$ et $D \to A$.

1) Quel est la forme du cycle dans le diagramme de Clapeyron ?

2) Dans quel sens est décrit le cycle dans le diagramme de Clapeyron ?

3) Établir le rendement η du moteur thermique en fonction des quatres températures, puis en fonction de γ, P_1 et P_2. Application numérique

4) Comparer au rendement de Carnot en considérant la température la plus froide T_B et la plus chaude T_D.

Données : $P_1 = 20$ bar et $P_2 = 80$ bar ; $T_B = 300$ K et $T_D = 1300$ K ; $\gamma = 1{,}4$.

T1 — 15 Utilisation d'une bouilloire (Résolution de problème)

1) Déterminer la puissance d'une bouilloire à partir de son observation en fonctionnement.

2) L'électricité en France coûte aux alentours de 15 centimes le kWh. Par année, combien coûte l'utilisation d'une bouilloire si vous buvez une tisane par jour ?

T1 — 05 Mesure de la capacité calorifique de solides par méthode des mélanges

La calorimétrie est la science de la mesure des transferts thermiques. En pratique elle correspond à la mesure des capacités calorifiques ou des chaleurs latentes de transition de phase des corps.

La calorimétrie repose sur le premier principe : si deux corps en contact sont isolés du reste de l'univers, l'énergie reçue par l'un est forcément perdue par l'autre. L'expérience se fait dans un calorimètre, qui est une enceinte calorifugée permettant d'isoler thermiquement un corps de l'extérieur. On distingue notamment le calorimètre de Dewar (dont les bouteilles « thermos » sont une réalisation), constitué de deux parois entre lesquelles un vide est fait.

Une grandeur souvent utilisée en calorimétrie est la valeur en eau μ du calorimètre, définie comme le rapport de sa capacité calorifique Γ sur la capacité calorifique massique de l'eau c_e : $\mu = \Gamma \,/\, c_e$. Cette valeur en eau s'exprime en g et représente la masse équivalente d'eau du calorimètre.

Un calorimètre contient initialement une masse $m_1 = 1000$ g d'eau à $T_1 = 15$°C. On y verse une masse $m_2 = 1000$ g d'eau à $T_2 = 65{,}5$°C. La température du mélange à l'équilibre est $T_f = 40$°C.

1) Calculer la capacité thermique Γ du calorimètre ainsi que sa valeur en eau μ.

On souhaite utiliser ce calorimètre pour déterminer la capacité calorifique massique du cuivre solide. On place désormais dans ce même calorimètre vidé une masse $m_1 = 200$ g d'eau, le tout étant alors à une température $T_1 = 14{,}5$°C. On y ajoute une masse $m_2 = 200$ g de cuivre solide à la température $T_2 = 100$°C. À l'équilibre, la température finale du mélange est $T_f = 21{,}3$°C.

2) En déduire une expression de c la capacité calorifique massique du cuivre en fonction de T_1, T_2, c_e, μ, m_1 et m_2. Application numérique pour c.

Données : capacité calorifique massique de l'eau $c_e = 4{,}18$ kJ·K^{-1}· kg^{-1}.

T1 — 06 Mesure d'enthalpies massiques de vaporisation par méthode électrique

On fait à nouveau de la calorimétrie, cette fois pour déterminer l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau L_{vap}. On propose une méthode « électrique ».
On place sur le plateau d'une balance un récipient calorifugé contenant de l'eau maintenue en ébullition par une résistance parcourue par un courant constant d'intensité $i = 2{,}5$ A. La tension aux bornes de la résistance est alors $u = 5$ V. La vapeur s'échappe par un orifice dans l'atmosphère extérieure dont la pression est $P_0 = 1$ atm. Après avoir taré la balance, on constate que le récipient a perdu une masse de 2 g pendant la durée $\Delta t = 400$ s.

1) On néglige les pertes de thermique. Déterminer $L_{\text{vap}}^{\text{exp}}$.

2) Que pensez-vous du résultat ? Est-ce une erreur de n'avoir pas tenu compte de la capacité calorifique du calorimètre ?

Données : enthalpie massique tabulée de vaporisation de l'eau $L_{\text{vap}}^{\text{tab}} = 2{,}26 \times 10^3$ kJ·kg^{-1}.

T1 — 07 Contacts successifs avec N thermostats

On désire porter progressivement un solide, de capacité thermique C, de la température T_i à la température $T_f > T_i$. Pour réaliser cette transformation, le solide est mis successivement en contact avec N thermostats de température T_k telle que

$$T_k = T_i + k\,\frac{T_f - T_i}{N}$$

avec $k = 1{,}2{,}\ldots{,}N$.

1) Déterminer l'entropie créée S_c^k au cours du contact avec le thermostat k.

2) On pose $\varepsilon_k = \dfrac{T_k - T_{k-1}}{T_k}$. Donner une expression approchée de S_c^k pour $\varepsilon_k \ll 1$.

3) Toujours dans la limite $\varepsilon \ll 1$, exprimer l'entropie créée S_c à l'issue des N contacts. Commenter le résultat pour $N \to \infty$.

On rappelle que l'expression de la variation d'entropie d'un solide entre un état initial i et un état final f est

$$\Delta S_{i\to f} = C \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$$

T1 — 08 Changement d'état

La pression atmosphérique est P_0. Dans une enceinte calorifugée de capacité calorifique $C = 120$ J·K^{-1}, on verse une masse $m_1 = 200$ g d'eau. La température qui s'établit à l'équilibre est $T_1 = 18$°C. On introduit alors un cube de glace de masse $m_2 = 72$ g pris initialement à la température $T_2 = -10$°C. Un nouvel équilibre thermodynamique s'établit.

1) Quels sont les états d'équilibre a priori possibles ?

2) L'état final réèl est un mélange d'eau et de glace. Déterminer la masse de chacun des deux constituants ainsi que la température finale.

3) Déterminer la variation d'entropie ΔS du système {eau liquide + glace + calorimètre} entre l'introduction de la masse d'eau et l'équilibre final. On considèrera pour cela d'abord les changements de température de l'eau et de la glace puis leur changement d'état. Application numérique. Commentaire.

On rappelle que l'expression de la variation d'entropie d'une phase incompressible indilatable entre un état initial i et un état final f (hors changement d'état) est

$$\Delta S_{i\to f} = C \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$$

Données : température de fusion de la glace à P_0 : $T_{\text{fus}} = 273$ K $= 0$°C ; capacité calorifique massique de l'eau liquide : $c_e = 4{,}18$ kJ·K^{-1}· kg^{-1} ; capacité calorifique massique de la glace : $c_g = 2{,}09$ kJ·K^{-1}· kg^{-1} ; enthalpie massique de fusion de la glace : $L_{\text{fus}} = 330$ kJ·kg^{-1}.

T1 — 09 Gonflage de pneus (Résolution de problème)

Un pneu de volume $V_1 = 50$ L est gonflé au moyen d'air comprimé contenu dans une bouteille de volume $V_0 = 80$ L, de pression initiale $P_0 = 15$ bars.

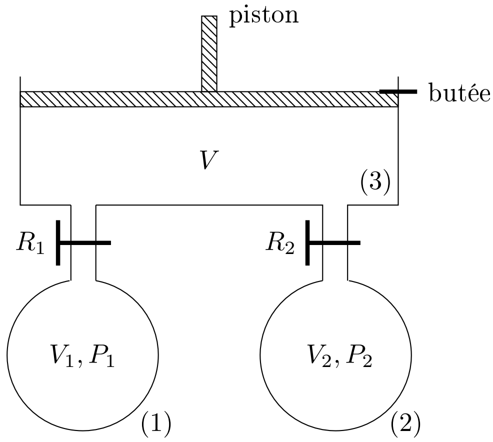
1) La pression initiale dans le pneu est la pression ambiante et la pression finale $P_1 = 2{,}6$ bars. Déterminer la pression finale P_f dans la bouteille à la fin du gonflage d'un pneu.

2) Combien de pneus peut-on gonfler avec cette bouteille ?

T1 — 10 Un système de pompage

Une pompe fonctionne de la manière suivante :

- **Phase d'aspiration**. Le piston est au fond du réservoir (3). Le robinet R_1 est ouvert, et R_2 est fermé. Le piston est alors déplacé lentement par un opérateur jusqu'à sa position finale en butée délimitant un volume V dans (3).
- **Phase de refoulement**. On ferme R_1 et on ouvre R_2. L'opérateur appuie lentement sur le piston de manière à ce qu'il retrouve sa position initiale, au fond de (3).



Les parois sont diathermanes. Les compartiments (1) et (2), de volume V_1 et V_2, renferment initialement (donc lorsque le piston est au fond de (3)) des gaz parfaits aux pressions

$$P_1(0) = P_2(0) = P_0$$

1) Déterminer $P_1(n)$ après n réalisations des deux phases d'aspiration et de refoulement.

2) En déduire l'expression de $P_2(n)$.

3) Donner les limites de $P_1(n)$ et $P_2(n)$ lorsque n tend vers l'infini. Comment peut-on retrouver rapidement ces valeurs ?

T1 — 11 Tisane (Résolution de problème)

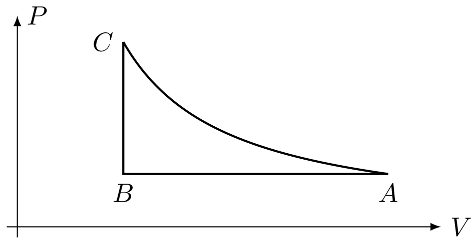
Juste avant de vous mettre à travailler, vous faites une tisane en portant de l'eau à ébullition. Hélas, un exercice accapare toute votre attention et vous oubliez complètement la tisane, qui va alors refroidir lentement.

1) Quelle sera la température finale de la pièce dans laquelle vous travaillez ?

Données. La capacité thermique massique de l'eau est $c = 4{,}18\ \mathrm{kJ \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$. La capacité thermique molaire à pression constante de l'air est $c_{pa} = 29{,}1\ \mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$.

T1 — 12 Cycle de Lenoir

Le cycle de Lenoir est constitué des 3 étapes suivantes : $A \leftrightarrow B$ est une isobare, $B \leftrightarrow C$ une isochore puis $C \leftrightarrow A$ une isotherme de température T.



On note $\alpha = V_A \,/\, V_B$. On suppose que le cycle est parcouru de manière quasi-statique par une mole de gaz parfait avec $\gamma = 1{,}4$; et on souhaite pour commencer étudier le cycle **moteur**.

1) Dans quel sens le cycle doit-il être parcouru pour être moteur ?

2) Calculer ΔU, W et Q pour chacune des trois étapes, en fonction de α, T et T_B la température à l'état B.

3) Que vaut T_B en fonction de T et α ?

4) Quels transferts thermiques sont reçus ? En déduire la définition du rendement de ce cycle.

5) Montrer finalement que le rendement est, en fonction de α,

$$\eta = 1 - \frac{\gamma\,(\alpha - 1)}{(\gamma - 1)\,\alpha \ln \alpha + \alpha - 1}$$

6) On donne $\alpha = 2$ et $T = 580$ K. Le moteur fonctionne à 2000 tr/min. Quelle est la puissance du moteur en watt ? Convertir en chevaux sachant que 1 ch = 746 W.

---

7) Si le cycle est parcouru dans l'autre sens, il est **récepteur** et peut servir de réfrigérateur ou de pompe à chaleur. Dans le cas où il est utilisé comme pompe à chaleur, quelle est son efficacité ?

Remarque. Dans la littérature, le cycle de Lenoir est parfois décrit avec une étape isentrope à la place de l'isotherme.

T1 — 14 Transformation adiabatique réversible

On considère un fluide qui vérifie la relation $P\,V = a\,U$, où a est une constante et U est l'énergie interne.

1) Établir la relation qui lie la pression et le volume dans une transformation adiabatique réversible.

T1 — 13 Machine thermique – Cycle de Diesel

On étudie un moteur thermique réalisant 4 étapes : une compression isentrope réversible ($1 \to 2$), une isobare ($2 \to 3$), une détente isentrope réversible ($3 \to 4$), puis une isochore ($4 \to 1$). Le cycle est parcouru de manière quasi-statique. Les températures, pressions et volumes à l'état i sont notés T_i, P_i et V_i. Le fluide calorifique est un gaz parfait. On note γ le rapport des capacités thermiques à pression et à volume constants. On note aussi $a = V_1/V_2$ le taux de compression et $c = V_3/V_2$.

1) Décrire sommairement à l'aide d'un schéma le fonctionnement d'un moteur thermique.

2) Dessiner dans un diagramme (P, V) le cycle décrit par le fluide (aide : l'état 1 est en bas à droite).

3) Déterminer le travail et le transfert thermique reçu pour chacune des 4 étapes.

4) Déterminer l'expression du rendement du moteur en fonction des T_i, puis en fonction de a, c et γ.

5) Calculer numériquement le rendement pour $a = 0{,}3$ et $c = 2$.

T1 — 16 Expérience de Clément-Desormes

L'expérience mise au point par les français Nicolas Clément (1779-1841) et Charles Desormes (1777-1862) permet de mesurer la valeur de l'exposant adiabatique γ d'un gaz. Le dispositif expérimental présenté ci-dessous est constitué d'un ballon en verre, transmettant faiblement la chaleur. Il contient le gaz à étudier, initialement en légère surpression par rapport à la pression atmosphérique P_0, et est muni d'un robinet permettant d'ouvrir le ballon sur l'extérieur et d'un manomètre à mercure (masse volumique ρ). L'extérieur est à la température T_0. Initialement, la différence de hauteur Δh du liquide dans le manomètre est h_i. L'expérimentateur ouvre alors le robinet, et Δh devient presque instantanément nulle. On note T_1 la température du gaz juste après l'ouverture. L'expérimentateur referme alors le robinet. On observe que Δh ré-augmente lentement jusqu'à une valeur h_f. On pourra supposer que les surpression $\rho\, g\, \Delta h$ sont faibles devant P_0, et que l'ouverture du robinet est réversible.

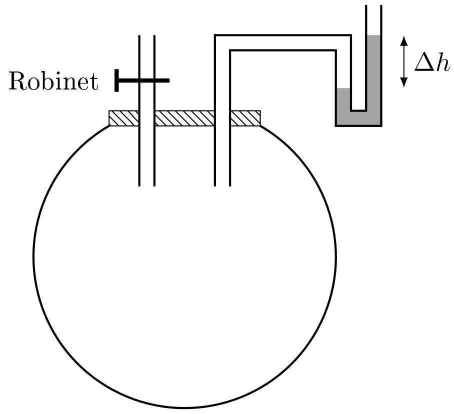
1) Qualifier les deux transformations (adiabatique, isobare, isotherme, isochore,...) subies par le gaz restant dans le ballon.

2) Exprimer la température T_1 en fonction de P_0, T_0, ρ, g et h_i.

3) Obtenir ensuite une nouvelle relation avec T_1, cette fois en fonction de h_f.

4) En déduire une relation entre h_i, h_f et γ.

5) On donne $h_i = 6{,}20$ mm, $h_f = 1{,}75$ mm et $\rho = 13{,}6\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Mercure). Calculer γ et commenter.



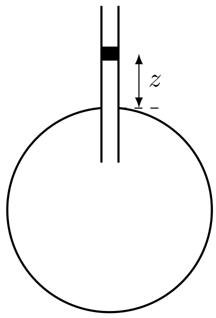
T1 — 17 Expérience de Rückhardt

Un récipient dont la forme est indiquée ci-dessous contient un gaz parfait. Le tube fin qui le surmonte est obturé par un piston de masse m et de section a pouvant coulisser sans frottement. Toutes les parois sont calorifugées et la pression extérieure est P_0.

1) Déterminer la pression du gaz à l'équilibre.

2) On écarte légèrement le piston de sa position d'équilibre et on le lâche. Écrire l'équation différentielle qui régit son mouvement, en supposant que les transformations du gaz sont réversibles.

3) Montrer que le piston oscille autour de sa position d'équilibre, et donner la relation entre la pulsation ω de ces oscillations et le rapport $\gamma = c_P/c_V$ du gaz.



T1 — 18 Coût de fonctionnement d'un réfrigérateur

La température à l'intérieur d'un réfrigérateur est réglée à 2°C, tandis que celle de la pièce atteint 22°C. On suppose que les parois sont adiabatiques et que chaque ouverture de la porte du réfrigérateur introduit une quantité de chaleur de 200 kJ, sans modifier la température intérieure. On considère aussi que l'efficacité réelle du réfrigérateur avoisine 15 % de celle qui résulterait du fonctionnement réversible.

1) À combien s'élève la dépense mensuelle, en considérant 15 ouvertures de porte par jour ?

Données : le kilowatt-heure coûte environ 0,15 €.

T1 — 19 Cycle de Stirling

Un moteur fonctionne entre une source chaude de température $T_C = 450$ K et une source froide de température $T_F = 300$ K. L'agent thermique est constitué de n moles de gaz parfait de coefficient $\gamma = C_P/C_V = 1{,}40$. Il décrit de manière quasi-statique le cycle suivant :

- AB : compression isotherme à T_F ;
- BC : isochore à V_1 ;
- CD : détente isotherme à T_C ;
- DA : isochore à V_2.

On donne $R = 8{,}314\ \mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$, et $\alpha = V_2/V_1 = 2$ le taux de compression.

1) Représenter le cycle dans un diagramme de Clapeyron.

2) Calculer les différents transferts thermiques reçus par le gaz au cours du cycle.

3) Définir puis exprimer le rendement η de ce moteur. Le calculer.

4) Afin d'améliorer le rendement du moteur, on utilise un dispositif qui permet d'éviter les échanges thermiques avec l'extérieur en dehors des deux phases isothermes. Calculer le nouveau rendement η'. Commenter.