TD 13

Deuxième principe de la thermodynamique

Exercice 1 : Questions de cours

1. Rappeler les définitions d'équilibre thermodynamique, d'équilibre thermodynamique interne à tout instant.
2. Définir la notion de transformation réversible. Quelles sont les conditions nécessaires pour obtenir une transformation réversible ? Quelles sont les sources d'irréversibilité ?
3. Enoncer le second principe de la thermodynamique.
4. Donner les deux premières identités thermodynamiques.
5. Définir la notion de thermostat ou source idéale de chaleur.
6. Définir l'entropie élémentaire reçue/échangée.
7. Définir l'entropie massique de changement de phase. Donner son expression en fonction de la chaleur latente (en enthalpie massique de changement de phase).
8. Enoncer les lois de Laplace. Présenter les 4 hypothèses permettant de les utiliser.
9. Définir les termes : machines thermiques, moteur thermique, récepteur thermique.
10. Montrer qu'il ne peut exister de cycle monotherme moteur.
11. Définir le rendement d'un moteur ditherme. Donner son expression.
12. Enoncer le théorème de Carnot.
13. Définir l'efficacité d'un récepteur ditherme. Expliquer en quoi elle diffère d'un rendement.
14. Définir l'efficacité de Carnot.
15. Présenter le cycle moteur ditherme de Carnot. Donner deux exemples dans un diagramme de Clapeyron. Pourquoi ce cycle n'est-il pas efficace ?

Exercice 2 : Applications directes du cours

1. Variation d'entropie du gaz parfait
   En utilisant l'expression de la variation d'entropie, l'expression de l'énergie interne d'un gaz parfait et la loi des gaz parfait pour une évolution quasi–statique montrer que :
   $$\Delta S = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + nR\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$
   En déduire l'expression de la fonction entropie pour un gaz parfait.
2. Reformulation de l'entropie du gaz parfait
   Utiliser la relation de Mayer et la loi des gaz parfaits pour exprimer l'entropie du gaz parfait en fonction d'autres variables thermodynamiques : $S(T,p)$ et $S(p,V)$. En utilisant l'expression $C_v = \frac{nR}{\gamma-1}$, compactez les différentes expressions de l'entropie du gaz parfait $S(T,V)$, $S(T,p)$ et $S(p,V)$.
3. Déterminer la variation d'entropie pour une transformation isotherme ; pour une transformation isobare ; pour une transformation isochore.
4. Variation d'entropie d'une phase incompressible et indilatable
   En utilisant l'expression de la variation d'entropie, l'expression du premier principe et l'hypothèse d'une phase condensé incompressible et indilatable montrer que :
   $$\Delta S = mc \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$
5. Un cylindre parfaitement calorifugé, muni d'un piston mobile sans frottement, également calorifugé, contient un gaz parfait diatomique ($\gamma = 1{,}4$). Initialement, la pression du gaz à l'intérieur du cylindre est $p_i = 0{,}5$ bar, le volume $V_i = 1{,}0$ L et la température $T_i = 298$ K. La pression extérieure est $p_{ext} = 1{,}0$ bar. On amène le gaz de façon réversible à la pression $p_0 = p_{ext} = 2p_i = 1{,}0$ bar.
   a. Calculer le volume V_0 et la température T_0 à l'état final. Calculer l'entropie créée.
   b. En partant du même état initial que précédemment, on abandonne le piston et on laisse l'équilibre s'établir. Quelle est la nature de la transformation ?
   c. Calculer le volume V_0 et la température T_0 à l'état final. Calculer l'entropie créée.

Exercice 3 : Transformation d'un gaz

On effectue de trois manières différentes une compression qui amène un mélange air-essence de l'état 1 (P_1=1 bar, V_1=3 L) à l'état 2 (P_2=3 bar, V_2=1 L).

On suppose le mélange assimilable à un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,4$.

- La première évolution est isochore puis isobare.
- La deuxième évolution est isobare puis isochore.
- La troisième évolution est isotherme à T_0.

Pour chacune de ces transformations, le milieu extérieur est à température constante T_0.

1. Représenter les trois transformations dans un diagramme de Clapeyron.
2. Quelle est la variation d'énergie interne ΔU entre l'état 1 et l'état 2 pour chacune de ces transformations ?
3. Calculer les travaux et les transferts thermiques échangés dans les trois cas. On supposera les transformations mécaniquement réversibles.
4. Faire un bilan d'entropie pour chacune des trois transformations. Calculer les entropies molaires. Conclure.

Exercice 4 : Retour sur la détente de Joule Gay-Lussac

Soit n moles de gaz parfait subissant une détente de Joule-Gay Lussac d'une enceinte de volume V_1 vers une deuxième enceinte de volume V_2. On rappelle que la transformation est adiabatique et isotherme pour un gaz parfait.

1. La transformation est-elle réversible ?
2. Si ce n'est pas le cas, quelles sont les causes d'irréversibilité ?

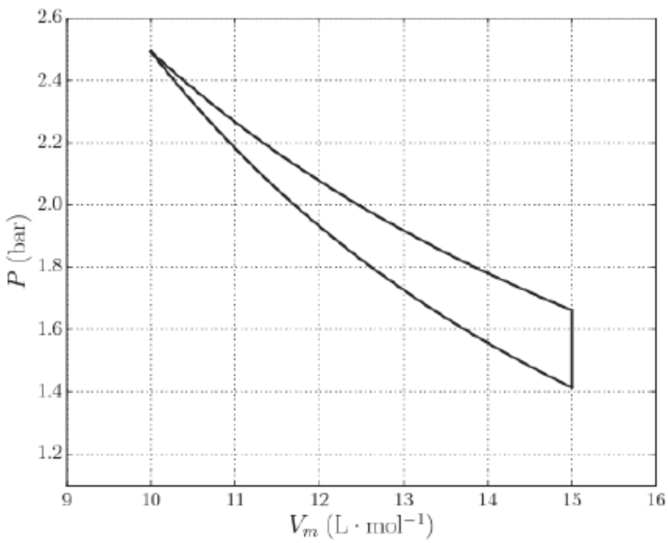
Exercice 5 : Compression isotherme réversible ou non d'un gaz parfait

Soit n moles de gaz parfait enfermées dans un cylindre fermé par un piston de section s et de masse négligeable pouvant se mouvoir à la verticale. Les parois du cylindre sont en contact avec un thermostat de température T_0. La pression extérieure est constante et notée P_0. On suppose le gaz initialement à l'équilibre thermodynamique.

On ajoute une masse m sur le piston, soit de manière progressive (ajout progressif de petites masses dm de somme totale m), soit en un seul dépôt (dépôt d'une unique masse m à l'instant initial). A l'état final, l'équilibre est atteint dans les deux cas.

1. Quel(s) type(s) de transformation subit le gaz dans le premier cas ?
2. Calculer le travail total des forces reçu par le gaz dans le premier cas.
3. En déduire l'expression du transfert thermique reçu par le gaz dans le premier cas.
4. Effectuer un bilan d'entropie sur le gaz dans le premier cas. La transformation est-elle réversible au sens de l'entropie ?
5. Reprendre les questions dans le cas du dépôt unique d'une masse m.

Exercice 6 : Adiabatique vs. isotherme



Une mole d'un gaz parfait de coefficient isentropique subit un cycle de transformation représenté sur le diagramme ci-contre :

- partant de l'état (1) de pression P_1 = 2, 5 bar, une détente isotherme réversible l'amène à l'état (2),
- elle subit ensuite une évolution isochore l'amenant dans l'état (3),
- puis retourne dans l'état (1) par une compression adiabatique réversible.

La seconde transformation a lieu en contact thermique avec un thermostat à la température T_e = 200 K.

1. En justifiant soigneusement, placer les points (1), (2), (3) sur le diagramme.
2. En déduire la valeur du coefficient γ. Le gaz parfait est-il diatomique ou monoatomique ?
3. Pour chacune des transformations (i)→ (j), calculer la variation d'énergie interne ΔU_{ij}, le travail W_{ij}, le transfert thermique reçu Q_{ij} et la variation d'entropie ΔS_{ij} du gaz.
4. Pour chacune des transformations, faire un bilan entropique, et calculer l'entropie créée. Identifier si nécessaire les causes d'irréversibilité.

Exercice 7 : Entropie de mélange

Un cylindre parfaitement isolé est séparé en deux compartiments de volume V_0, par une paroi escamotable. Initialement, chaque compartiment contient un gaz parfait à la même température T_0. Supposons que l'un renferme de l'hélium (n_1 mol, $C_{Vm1} = 3R/2$ à la pression p_1) et l'autre du dihydrogène (n_2 mol, $C_{Vm2} = 5R/2$ à la pression p_2).

Supprimons la paroi escamotable ; on atteint un nouvel état d'équilibre caractérisé par : $V_F = 2V_0$, p_F et T_F, les deux gaz, par diffusion, constituant un gaz parfait unique.

1. Calculer p_F et T_F.
2. Effectuer un bilan entropique pour cette transformation.

Exercice 8 : Système Glace/Eau liquide dans un calorimètre

Dans un vase parfaitement calorifugé de capacité thermique $C = 120\ \mathrm{J.K^{-1}}$, on verse $m_1 = 200$ g d'eau de capacité thermique massique $c_e = 4200\ \mathrm{J.K^{-1}.kg^{-1}}$. La température d'équilibre s'établit $\theta_1 = 18$ °C. On y introduit alors un cube de glace de masse $m_2 = 72$ g pris initialement à la température $\theta_2 = -10$ °C et on agite jusqu'à obtention d'un nouvel équilibre thermique.

La capacité thermique massique de la glace est $c_g = 2090\ \mathrm{J.K^{-1}.kg^{-1}}$; et la chaleur latente de fusion est, à 0 °C et sous la pression atmosphérique normale : $l_f = 333\ \mathrm{kJ.kg^{-1}}$.

1. Déterminer, lorsque l'équilibre est atteint, la température finale T_f et faire un bilan glace/eau.
2. Calculer (littéralement et numériquement) la variation d'entropie, pour le système {eau liquide + glace + calorimètre}, consécutive à l'introduction de la glace.

Exercice 9 : Découpe laser

Une feuille d'aluminium d'épaisseur e = 0, 5 µm constante, dont la température initiale est T_0 = 293 K, est déposée horizontalement sur un matériau thermique isolant. Elle reçoit, perpendiculairement à sa surface, un faisceau laser homogène de section S = 2, 0.10^{-7} m^2 et de puissance moyenne P.

Le principe de la découpe laser est de faire passer l'aluminium sous forme solide à de l'aluminium sous forme liquide puis vapeur grâce à l'apport thermique du laser.

1. Proposer un chemin fictif pour la transformation de l'aluminium solide à T_0 jusqu'à l'aluminium vapeur à T_V = 2740 K.
2. En déduire l'échange thermique minimal à apporter pour qu'un cylindre de surface S soumis au laser se vaporise entièrement.

On suppose que toute l'énergie du faisceau laser est absorbée par la couche d'aluminium qui y est soumis et que cette énergie est confinée dans la couche visée et n'est pas diffusée dans le reste de la feuille. On suppose que le laser s'attarde pendant une durée Δt = 1 ms sur chaque zone visée.

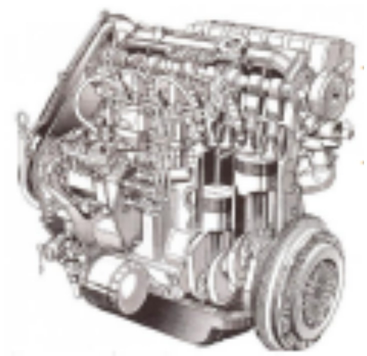
3. En déduire la puissance minimale du laser nécessaire à la découpe.
4. Faire un bilan d'entropie sur la transformation.

Données :

- Température de fusion de l'aluminium : T_f = 933 K
- Température de vaporisation de l'aluminium (sous pression atmosphérique normale) : T_V = 2740 K.
- Chaleur latente de fusion de l'aluminium à T_f : l_f = 397 kJ.kg^{-1}
- Chaleur latente d'évaporation de l'aluminium à T_V : l_v = 10500 kJ.kg^{-1}
- Masse volumique de l'aluminium : ρ = 2699 kg.m^{-3}
- Capacité thermique de l'aluminium solide : c_s = 900 J.K^{-1}.kg^{-1}
- Capacité thermique de l'aluminium liquide : c_l = 1090 J.K^{-1}.kg^{-1}

Exercice 10 : Moteur Diesel

Ce moteur, inventé par Rudolf Diesel en 1893, est un moteur à quatre temps :



- **1er temps : admission**
  Cette phase est semblable à celle du moteur à essence, mais seul de l'air est aspiré.
- **2ème temps : compression**
  Cette phase est identique à celle du moteur à essence, les soupapes sont fermées.
- **3ème temps : combustion-détente**
  Le combustible (en général du gazole, moins raffiné que l'essence) est injecté sous pression en haut du cylindre. A la température élevée de l'air comprimé, l'inflammation se produit spontanément (absence de bougie). La combustion progressive produit des gaz qui repoussent le piston ; quand la combustion s'arrête, les gaz se détendent. Ce temps constitue la phase motrice.
- **4ème temps : échappement**
  Cette phase est identique à celle du moteur à essence.

On adopte le modèle du moteur Diesel suivant : une même quantité d'un gaz supposé parfait de coefficient de Laplace constant γ = 1,4 décrit un cycle d'Otto ABCD :

- La compression AB est adiabatique réversible.
- L'évolution BC modélise la phase de combustion, provoquée par l'inflammation spontanée du mélange, par une évolution isobare au cours de laquelle le gaz reçoit un transfert thermique Qc en provenance d'une source chaude fictive de température Tc.
- La détente CD est adiabatique réversible.

- L'ouverture de la soupape DA est modélisée par une évolution isochore au contact de l'atmosphère (source froide de température TA).

	A	B	C	D
p en bar	1,00			
T en K	323	954		
V en L	2,40		0,24	

1. Compléter le tableau et tracer l'allure du cycle dans un diagramme de Watt.
2. Calculer les travaux et les transferts thermiques reçus par le gaz au cours de chacune des évolutions.
3. Définir et calculer le rendement. Le comparer au rendement de Carnot.

Exercice 11 : Un dispositif thermodynamiquement avantageux

La température extérieure étant $T_1 = -23$ °C, on veut maintenir dans une serre une température constante de $T_2 = 26$ °C. Par un système de chauffage central ordinaire, on brûle une masse m de charbon par jour, ce qui fournit la quantité de chaleur q nécessaire pour compenser les déperditions journalières. Les gaz brûlés sont encore, en sortant de la cheminée, à plus de 300 °C.

Un ingénieur vient proposer un dispositif thermodynamiquement plus avantageux, où sont toujours extraits q Joules de gaz chauds pour m kg de charbons brûlés, mais sur un temps plus long. La combustion du charbon assure d'abord l'entretien de la vapeur d'eau dans une chaudière à $T_3 = 227$ °C. Deux machines de Carnot sont ensuite placées entre les températures T_1 et T_2 et entre les températures T_2 et T_3. En régime permanent, les températures sont constantes.

1. Dessiner l'organigramme du dispositif proposé et préciser la nature motrice ou réceptrice des machines de Carnot.
2. Expliciter, en fonction de q, les quantités d'énergie échangées par les deux machines pour une masse m de charbons brûlés.
3. En déduire la quantité d'énergie reçue par la serre pour une masse m de charbons brûlés.
4. Donner la durée Δt durant laquelle le chauffage est assuré par ce dispositif pour une masse m de charbons brûlés. Commenter.

Exercice 12 : Centrale électrique

Une centrale électrique peut être considérée comme un moteur thermique où le fluide caloporteur (de l'eau, de capacité thermique massique $c_{eau} = 4185$ J.K^{-1}.kg^{-1} et de masse volumique $\rho_{eau} = 10^3$ kg.m^{-1} décrit un cycle entre deux sources :

- La source chaude S_1 qui correspond au cœur du réacteur, de température T_1=327 °C;
- La source froide S_2 qui correspond à l'eau d'un fleuve de température constante T_2=15 °C.

Au cours de ce cycle, la centrale fournit un travail total W.

1. Faire le schéma de principe de la centrale électrique.
2. En prenant comme référence le fluide caloporteur, préciser, en les justifiant, les signes des transferts thermiques Q_1 et Q_2 que le fluide caloporteur échange avec les sources, ainsi que le signe du travail W.
3. Donner la définition du rendement thermodynamique de ce cycle.
4. Établir l'expression du rendement de Carnot η_c pour cette machine. Faire l'application numérique.
5. Le rendement réel de la centrale n'est que de 58% du rendement de Carnot. Calculer ce rendement η.
6. Le cœur de la centrale fournit une puissance thermique de 3000 MW. En déduire la puissance électrique fournie par la centrale.
7. Calculer la puissance thermique échangée avec la source froide.
8. L'élévation de la température de l'eau du fleuve ne doit pas excéder 2 °C. Calculer le débit volumique D_v minimal du fleuve. L'exprimer en m^3.s^{-1}.